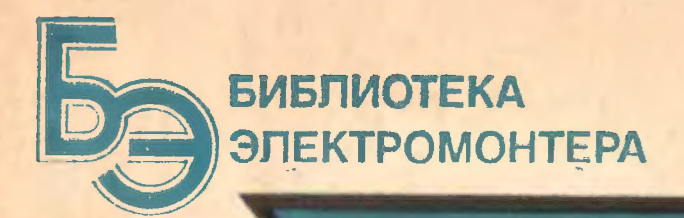
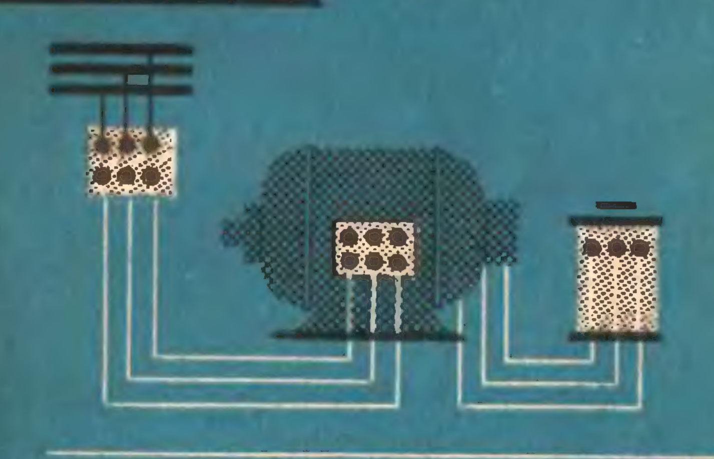




Н. Д. ТОРОПЦЕВ

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В СХЕМЕ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ С КОНДЕНСАТОРОМ





Выпуск 611

Основана в 1959 году

Н. Д. ТОРОПЦЕВ

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В СХЕМЕ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ С КОНДЕНСАТОРОМ

4-е издание,
переработанное и дополненное





МОСКВА
ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
1988

ББК 31.261.63
Т 61
УДК 621.313.333.1

Рецензент докт. техн. наук, проф. И. П. Копылов

Торопцев Н. Д.

Т 61 Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 95 с.: ил. — (Б-ка электромонтера; Вып. 611).

ISBN 5-283-01052-X

Рассмотрены особенности применения трехфазного асинхронного двигателя в качестве конденсаторного и различные схемы включения. Даны соотношения для определения рабочей емкости конденсатора. Четвертое издание дополнено материалами по использованию конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками в качестве преобразователя фаз.

Для электромонтеров и электромехаников.

Т $\frac{2302030000\text{-}283}{051(01)\text{-}88}$ 139-88 ББК 31.261.63

ISBN 5-283-01052-X

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года», принятые XXVII съездом КПСС, предусматривают довести производство электроэнергии к 1990 г. до 1840—1880 млрд. кВт·ч; 75 % ее будет преобразовано электрическими двигателями в механическую энергию.

В настоящее время самыми распространенными электрическими двигателями в народном хозяйстве являются трехфазные асинхронные двигатели, которые в ряде случаев могут быть успешно использованы для работы от сети однофазного тока.

Четвертое издание книги «Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором», переработанное и дополненное, выходит в свет через 9 лет после третьего. За это время электротехнической промышленностью освоен выпуск новой унифицированной серии асинхронных двигателей АИ и конденсаторов с улучшенными массогабаритными показателями, изменились требования ГОСТ. Вследствие этого в новом издании переработаны практически все таблицы, содержащие справочные материалы по двигателям и конденсаторам, а также ряд других. Кроме того, настоящее издание дополнено разделом, в котором рассмотрены вопросы использования трехфазного асинхронного двигателя для преобразования однофазного напряжения в трехфазное.

Автор выражает глубокую благодарность рецензенту — заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, доктору техн. наук, проф. И. П. Копылову, а также редактору — канд. техн. наук, доц. В. М. Киселеву за ценные замечания, сделанные ими по рукописи.

Все пожелания автор просит посылать по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, Энергоатомиздат.

Автор

1. АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА. ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Широкое распространение в различных отраслях народного хозяйства получили асинхронные двигатели трехфазного тока с короткозамкнутым ротором. Они не имеют скользящих контактов, просты по устройству и обслуживанию Двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде показан на рис. 1 Основными его частями являются статор и ротор. Сердечники статора и ротора набирают из листов электротехнической стали.

В пазах сердечника статора укладывают и закрепляют трехфазную обмотку В зависимости от напряжения питающей сети и данных двигателя ее соединяют звездой или треугольником. Выводы обмоток статора маркируют, благодаря этому облегчается сборка нужной схемы соединения.

В соответствии с ГОСТ 183—74* приняты следующие обозначения выводов обмоток отдельных фаз соответственно начало и конец первой фазы *С1* и *С4*, второй — *С2* и *С5* и третьей — *С3* и *С6* (рис 2). Расположение выводов на коробке контактных зажимов двигателя должно удовлетворять требованию простоты соединения обмоток по любой схеме Обмотку ротора от его сердечника не изолируют. Ее вместе с вентиляционными лопатками выполняют литой из алюминия или его сплавов. Стержни обмотки и накоротко замыкающие их кольца образуют так называемую беличью клетку.

Конструктивное выполнение двигателей зависит от способа вентиляции и степени защиты.

Асинхронные короткозамкнутые двигатели единой серии 4А по способу охлаждения и степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или вращающимися частями, а также самой машины от попадания в нее посторонних тел имеют два исполнения (ГОСТ 14254—80): закрытое обдуваемое (обозначение IP44), защищенное (обозначение IP23).

Двигатели исполнения IP44 имеют аксиальную систему вентиляции. Воздух подается вентилятором и обдувает внешнюю оребренную поверхность станины.

Для двигателей IP23 характерна двусторонняя радиальная система вентиляции, которая осуществляется при помощи вентиляционных лопаток, расположенных на короткозамыкающих кольцах ротора

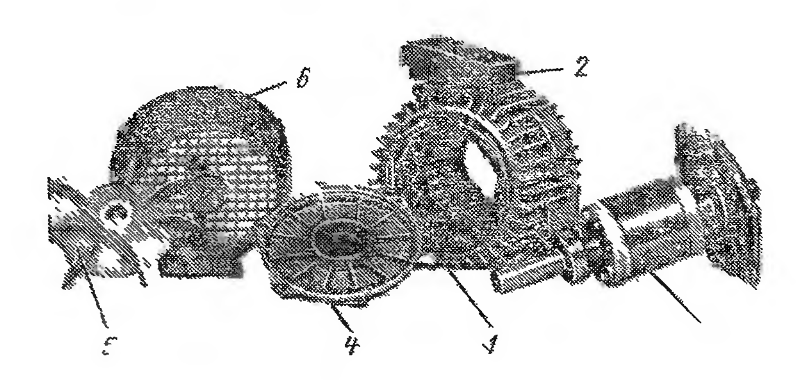


Рис. 1 Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разобранном виде

1 — статор, *2* — клеммная коробка, *3* — ротор *4* — подшипниковые щиты, *5* — вентилятор, *6* — кожух вентилятора

Двигатели этой серии имеют следующую структуру обозначений: 4 — порядковый номер серии; А — наименование вида двигателя — асинхронный; А — станина и щиты из алюминия; Х — станина из алюминия и чугунные щиты; 56—355 — высота оси вращения; S, L, M — установочные размеры по длине корпуса; А, В — обозначение длины сердечника (первая длина — А, вторая — В); 2, 4, 6, 8, 10, 12 — число полюсов; У — кли-

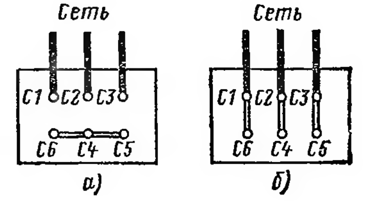


Рис 2 Расположение выводов на щитке двигателя при соединении: *а* — звездой; *б* — треугольником

Таблица 1

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	КПД, %	cos φ
	n_1=3000 об/мин		
4А50А2У3	0,09	60	0,7
4А50В2У3	0,12	63	0,7
4АА56А2У3	0,18	66	0,76
4АА56В2У3	0,25	68	0,77
4АА63А2У3	0,37	70	0,86
4АА63В2У3	0,56	73	0,86
4А71А2У3 4АХ71А2У3	0,75	77	0,87
4А71В2У3 4АХ71В2У3	1,1	77,5	0,87
4А80А2У3 4АХ80А2У3	1,5	81	0,85
4А80В2У3 4АХ80В2У3	2,2	83	0,87
4А902У3 4АХ902У3	3	84,5	0,88
	n_1=1500 об/мин		
4А50А4У3	0,06	50	0,6
4А50В4У3	0,09	55	0,6
4АА56А4У3	0,12	63	0,66
4АА56В4У3	0,18	64	0,64
4АА63А4У3	0,25	68	0,65
4АА63В4У3	0,37	68	0,69
4А71В4У3 4АХ71А4У3	0,55	70,5	0,7
4А71В4У3 4АХ71А4У3	0,75	72	0,73
4А80А4У3 4АХ80А4У3	1,1	75	0,81
4А80В4У3 4АХ80А4У3	1,5	77	0,83
4А904У3 4АХ904У3	2,2	80	0,83
4А1004У3	3	82	0,83
	n_1=1000 об/мин		
4АА63А6У3	0,18	56	0,62
4АА63В6У3	0,25	59	0,62
4А716У3 4АХ71А6У3	0,37	64,5	0,69
4А71В6У3 4АХ71В6У3	0,55	67,5	0,71

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	КПД, %	cos φ
4А80А6У3 4АХ80А6У3	0,75	69	0,74
4А80В6У3 4АХ80В6У3	1,1	74	0,74
4А906У3 4АХ906У3	1,5	75	0,74
4А1006У3	2,2	81	0,74
4А112МА6У3	3	81	0,76

матическое исполнение двигателей; 3 — категория размещения. Например: 4АА56А2У3 — электродвигатель серии 4, асинхронный, закрытого исполнения, станина и подшипниковые щиты из алюминия, с высотой оси вращения 56 мм, сердечник первой длины, двухполюсный, для районов умеренного климата, категории размещения 3.

Основные технические данные двигателей небольшой мощности серии 4А приведены в табл. 1.

Странами — членами СЭВ разработана и выпускается единая серия асинхронных двигателей АИ. Улучшение энергетических, пусковых и виброшумовых характеристик машин этой серии достигается за счет применения новых материалов и конструктивных решений.

Основные технические данные двигателей небольшой мощности серии АИ приведены в табл. 2.

Трехфазный ток, проходя по обмоткам статора, создает вращающееся магнитное поле. Частота вращения поля n_1 называется *синхронной*. Она зависит от частоты f_1 питающего напряжения и числа пар полюсов p машины:

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \qquad (1)$$

и при $f_1 = 50$ Гц принимает значения: 3000 об/мин ($p = 1$), 1500 об/мин ($p = 2$), 1000 об/мин ($p = 3$) и т. д.

Для частоты напряжения сети будем иметь:

$$f_1 = \frac{p n_1}{60}.$$

Ротор асинхронного двигателя, вращаясь в направлении вращения поля, развивает частоту, несколько

Таблица 2

Тип двигателя	Номинальная мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	КПД, %	cos φ
АИР71А2	0,75	3000	78,5	0,83
АИР71В2	1,1		79	0,83
АИР80А2	1,5		81	0,85
АИР80В2	2,2		83	0,87
АИР90L2	3		84,5	0,88
АИР71А4	0,55	1500	70,5	0,7
АИР71В4	0,76		73	0,73
АИР80А4	1,1		75	0,81
АИР80В4	1,5		78	0,83
АИР90L4	2,2		81	0,83
АИР100S4	3		82	0,83
АИР71А6	0,37	1000	65	0,66
АИР71В6	0,55		68,5	0,70
АИР80А6	0,75		70	0,72
АИР80В6	1,1		74	0,74
АИР90L6	1,5		76	0,72
АИР100L6	2,2		81	0,74
АИР80А2-ОМ2	1,5	3000	81	0,85
АИР80В2-ОМ2	2,2		83	0,87
АИР80А4-ОМ2	1,1	1500	75	0,81
АИР80В4-ОМ2	1,5		78	0,83
АИР80А6-ОМ2	0,75	1000	70	0,72
АИР80В6-ОМ2	1,1		74	0,74
АИИ90SА2	0,75	3000	77	0,8
АИИ90SВ2	1,1		79	0,82
АИИ90SВ4	0,75	1500	78	0,8
АИИ90SВ6	0,55	1000	76	0,68
АИИ100S6	0,75	1000	78	0,73
АИИ112S4	2,2	1500	84,5	0,84
АИИ112S6	1,1	1000	82	0,76

меньшую, чем синхронная, называемую асинхронной. Отставание ротора характеризуется скольжением s. Если частоту вращения ротора обозначить через n_2, то соотношение для скольжения примет вид

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \qquad (2)$$

или, %,

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100.$$

Из (2) следует, что скольжение асинхронного двига-

теля изменяется от единицы (при пуске, когда $n_2=0$) до нуля (при синхронной частоте вращения, т. е. когда $n_2=n_1$). Заметим, что точного равенства частоты вращения поля и ротора в двигательном режиме не достигается. Однако отставание ротора на холостом ходу машины так мало, что им можно пренебречь. Значения скольжений при полной нагрузке двигателя обычно составляют 4—6 %.

Выражение для частоты вращения ротора можно получить из соотношения (2):

$$n_2 = n_1 (1 - s)$$

или

$$n_2 = \frac{60 f_1}{p} (1 - s).$$

Заметим, что числитель правой части равенства (2) имеет определенный физический смысл. Разность частоты вращения поля и ротора представляет собой относительную частоту вращения, т. е. частоту вращения поля относительно ротора n_s, или частоту скольжения.

Пример. Известны $n_1=1000$ об/мин, $s=4$ %. Вычислить частоту вращения ротора и относительную частоту вращения.

Имеем: $n_2=1000(1-0{,}04)=960$ об/мин, $n_s=n_1-n_2=1000-960=$ $=40$ об/мин.

Частота ЭДС и токов, наводимых в обмотке ротора вращающимся магнитным полем, определяется частотой скольжения:

$$f_2 = \frac{p n_s}{60}.$$

Путем несложных преобразований это выражение приводится к виду

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \frac{n_1}{n_1} = \frac{p n_1}{60} \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s,$$

т. е. частота ЭДС и токов ротора при условии $f_1=\text{const}$ пропорциональна скольжению.

Пример. Найти частоту тока ротора для предыдущего примера. Имеем: $f_2=f_1 s=50\cdot 0{,}04=2$ Гц.

Развиваемая двигателем мощность в пределах нормальных нагрузок пропорциональна скольжению. Поэтому о нагрузке машины можно судить по скольжению.

Использование мощности двигателя в процессе его эксплуатации может быть различным. Коэффициент использования мощности

$$k_{\text{и}} = P_2/P_{\text{ном}}, \quad (3)$$

где P_2 — полезная мощность при произвольной нагрузке; $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность, т. е. полезная мощность, на которую рассчитана электрическая машина.

Номинальной мощности соответствует номинальное напряжение. Двигатель потребляет при этом номинальный ток, имея номинальные значения частоты вращения, мощности на валу, КПД и $\cos \varphi$.

Назначение двигателя состоит в преобразовании электрической энергии в механическую. В процессе преобразования возникают потери. Они представляют ту часть активной мощности, которая расходуется на нагревание обмоток, стали сердечника статора и преодоление сил трения.

Отношение полезной мощности P_2, развиваемой двигателем на валу, к активной мощности P_1, потребляемой им из сети, называется коэффициентом полезного действия:

$$\eta = P_2/P_1. \quad (4)$$

Кроме активной, двигатель потребляет реактивную намагничивающую мощность, необходимую для образования магнитного потока. Таким образом, полная мощность двигателя S состоит из активной и реактивной составляющих:

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q^2}, \quad (5)$$

где Q — реактивная мощность двигателя.

Об относительном значении преобразованной мощности судят по коэффициенту мощности. Чем лучше используется мощность машины, тем выше коэффициент мощности. Для его вычисления достаточно активную мощность P_1 разделить на полную:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S} = \frac{P_1}{3UI}, \quad (6)$$

где U, I — фазные значения напряжения и тока.

Пример. На щитке трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором имеются следующие обозначения: Δ/⅄, 220/

380 В, 10,5/6,1 А, 2,8 кВт, 50 Гц, 2880 об/мин, КПД=81,5 %, $\cos\varphi = 0{,}86$.

Из рассмотрения этих данных заключаем: номинальное напряжение фазы 220 В, номинальный фазный ток 6,1 А, полезная мощность $P_2=2{,}8$ кВт, число пар полюсов $p=1$. Так как синхронная частота вращения

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

(в данном случае она равна 3000 об/мин), то скольжение при номинальной нагрузке составит:

$$s_{\text{ном}} = \frac{3000 - 2880}{3000} 100 = 4\%.$$

Полная мощность двигателя при номинальной нагрузке

$$S_{\text{ном}} = 3U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} = 3 \cdot 220 \cdot 6{,}1 \approx 4000 \text{ В} \cdot \text{А} = 4 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Активная мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке,

$$P_{1\text{ном}} = 3U_{\text{ном}} I_{\text{ном}} \cos\varphi_{\text{ном}} = 3 \cdot 220 \cdot 6{,}1 \cdot 0{,}86 = 3{,}44 \text{ кВт}.$$

Потери в двигателе при номинальной нагрузке

$$\Sigma\Delta P_{\text{ном}} = P_{1\text{ном}} - P_2 = 3{,}44 - 2{,}8 = 0{,}64 \text{ кВт}.$$

С использованием данных табл. 1 построены кривые зависимости коэффициента мощности двигателей от их номинальной мощности (рис. 3).

Кривая *1* соответствует синхронной частоте вращения 3000 об/мин, *2* — 1500 об/мин и *3* — 1000 об/мин. Из рис. 3 видно, что коэффициент мощности асинхронного двигателя зависит от номинальной мощности и синхронной частоты вращения.

С увеличением мощности при постоянстве синхронной частоты вращения (n_1=const) уменьшается относительное значение воздушного зазора. Благодаря этому относительная реактивная намагничивающая мощность также уменьшается, а коэффициент мощности возрастает. К такому же результату приводит увеличение синхронной частоты вращения при постоянстве номинальной мощности двигателя. Скоростные машины имеют меньшие габариты, что обусловлено уменьшением вращающего момента, у них существенно уменьшается объем воздушного пространства между сердечниками статора и ротора.

Кривые зависимости удельной намагничивающей

мощности двигателей от номинальной при n_1=const показаны на рис. 4, откуда видно, что удельная намагничивающая мощность тем меньше, чем больше номинальная мощность двигателя и выше синхронная частота вращения.

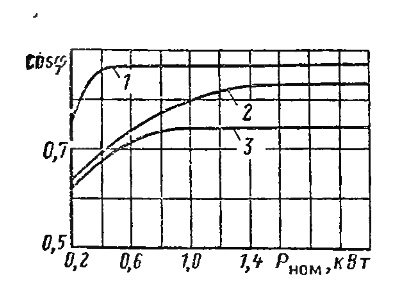


Рис. 3 Кривые зависимости коэффициента мощности от номинальной мощности асинхронных двигателей при различных значениях синхронной частоты вращения:

1 — n_1=3000 об/мин; *2* — n_1=1500 об/мин; *3* — n_1=1000 об/мин

Рис. 4. Кривые зависимости удельной намагничивающей мощности от номинальной мощности асинхронных двигателей при различных значениях синхронной частоты вращения:

1 — n_1=1000 об/мин; *2* — n_1=1500 об/мин; *3* — n_1=3000 об/мин

Переход от зависимостей, приведенных на рис. 3, к зависимостям на рис. 4 производят с использованием следующих соотношений:

$$P_{1ном} = \frac{P_{ном}}{\eta_{ном}}; \quad (7)$$

$$S_{ном} = \frac{P_{1ном}}{\cos\varphi_{ном}}; \quad (8)$$

$$Q_{ном} = S_{ном}\sqrt{1-\cos^2\varphi_{ном}}, \quad (9)$$

где $S_{ном}$, $Q_{ном}$ — полная и реактивная мощности двигателя при номинальной нагрузке.

Из сопоставления рис. 3 и 4 нетрудно сделать заключение о влиянии коэффициента мощности на энергетические показатели двигателей и питающей их системы: у двигателей с повышенным коэффициентом мощности при данной номинальной нагрузке ($P_2=P_{ном}$) реактивная намагничивающая мощность меньше. Это приводит к уменьшению полной мощности и, соответст-

венно, к уменьшению тока, потребляемого из сети. В результате электрические потери в обмотках машины уменьшаются и ограничивается падение напряжения в проводах системы электроснабжения.

2. РАБОТА ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ СЕТИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА. СПОСОБЫ ПУСКА

Трехфазный асинхронный двигатель нормального исполнения может создавать вращающий момент без принятия специальных мер при питании от сети однофазного тока.

Предположим, что цепь одного из проводов работающего двигателя, присоединенного к трехфазной сети, разомкнулась (например, вследствие перегорания плавкой вставки предохранителя). Машина, оказавшаяся в однофазном режиме с последовательным или последовательно-параллельным соединением обмоток статора (рис. 5), будет продолжать вращаться, преодолевая момент сопротивления нагрузки. В первом случае одна фа-

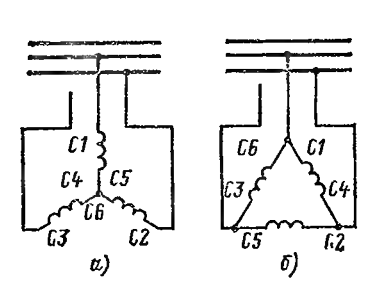


Рис. 5. Однофазное включение асинхронного двигателя при соединении:

а — звездой; *б* — треугольником

Рис. 6 Разложение пульсирующего магнитного поля на два вращающихся (*1* и *2*)

за полностью теряет питание, во втором происходит уменьшение напряжения на каждой из двух фаз, соединенных последовательно. Частота вращения двигателя при этом в обоих случаях снижается, а скольжение увеличивается.

Увеличение скольжения при неизменной нагрузке на валу сопровождается значительным возрастанием тока. Для предупреждения чрезмерного перегрева обмоток необходимо снизить нагрузку двигателя до 50—60 % номинальной. Остановив трехфазный двигатель, работающий в однофазном режиме, легко убедиться в том, что пустить его в ход непосредственно включением в сеть однофазного тока невозможно. Вращающий момент при пуске оказывается равным нулю. Это обусловлено характером магнитного поля статора, которое в однофазном режиме является пульсирующим.

Пульсирующее поле может быть представлено в виде двух полей, вращающихся с одной и той же синхронной частотой в противоположные стороны. Наибольшее значение (амплитуда) каждого из них равно половине амплитуды пульсирующего поля. Разложение пульсирующего поля и его изменение во времени иллюстрируются простым графическим построением (рис. 6) с допущением, что обмотка, по которой проходит ток (показанная в виде одного витка), создает в воздушном зазоре машины синусоидально распределенное магнитное поле (сплошная линия). Каждое из вращающихся полей (пунктирные линии *1* и *2*) наводит в обмотке ротора ЭДС, под влиянием которых возникают токи. Взаимодействие вращающихся полей с токами ротора приводит к образованию вращающихся моментов, направленных в противоположные стороны. Неподвижный ротор по отношению к этим полям находится в одинаковых условиях, поэтому вращающие моменты полностью уравновешивают друг друга, этим и объясняется то обстоятельство, что трехфазный двигатель в однофазном режиме не имеет начального (пускового) момента.

Прямое поле, т. е. поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, наводит в его обмотке токи небольшой частоты (2—3 Гц при частоте напряжения сети 50 Гц). Обозначим момент, обусловленный прямым полем, через M_1. Встречному (обратному) полю соответствует тормозной момент M_2. Токи, индуктированные в обмотке ротора

встречным полем, при малых значениях скольжения имеют повышенную частоту (около 100 Гц) и, становясь поэтому почти чисто реактивными, оказывают размагничивающее действие. Ослабление встречного поля вызывает уменьшение тормозного момента M_2.

Скольжение ротора по отношению к обратному полю равно

$$s_{обр} = \frac{n_1 - (-n_2)}{n_1} = \frac{n_1 + n_1(1-s)}{n_1} = 2 - s.$$

По этой причине токи ротора, наведенные обратным полем, имеют повышенную частоту

$$f_2 = f_1(2 - s).$$

Каждое из вращающихся магнитных полей (прямое и обратное) является круговым. Пространственный вектор магнитодвижущей силы (МДС) кругового поля вращается с равномерной скоростью (n_1=const), причем конец вектора перемещается по окружности. Диаграммы прямого и обратного магнитных полей с МДС $\bar{F}_1$ и $\bar{F}_2$ показаны на рис. 7, *а*, *б*.

Результирующее магнитное поле, обусловленное результирующей МДС $\bar{F}$, становится эллиптическим: конец вектора $\bar{F}$ при вращении описывает эллипс. Для эллиптического поля характерно непостоянство мгновенной скорости вращения пространственного вектора результирующей МДС и, соответственно, магнитного поля машины. Это обстоятельство может стать причи-

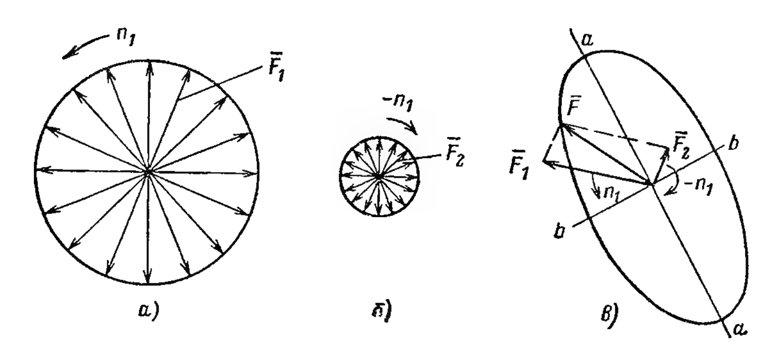


Рис. 7. Диаграммы вращающихся магнитных полей:
а — прямого кругового; *б* — обратного кругового; *в* — эллиптического

ной возникновения вибраций, особенно при малых моментах инерции ротора.

Построение диаграммы вращающейся МДС эллиптического поля приведено на рис. 7, *в*. Большая и малая оси эллипса находятся по соотношениям

$$a = 2(\bar{F}_1 + \bar{F}_2); \quad b = 2(\bar{F}_1 - \bar{F}_2).$$

Таким образом, эллиптическое поле можно рассматривать как результат наложения двух круговых полей — прямого и обратного.

Результирующий момент однофазного двигателя равен разности моментов от прямого и обратного полей:

$$M = M_1 - M_2. \qquad (10)$$

Наличие тормозного момента приводит к ухудшению характеристик двигателя в однофазном режиме: по сравнению с трехфазным двигатель имеет меньшие КПД и коэффициент мощности.

Уменьшение КПД связано с возрастанием потерь, обусловленных появлением обратного поля. Снижение коэффициента мощности объясняется увеличением намагничивающего тока.

Как уже отмечалось, существенным недостатком трехфазного двигателя при однофазном включении является отсутствие пускового момента. Двигатели малой мощности можно пустить в ход «от руки», но этот способ неприменим для более мощных приводов. Поэтому задача непосредственного пуска трехфазного двигателя от однофазной сети имеет важное значение. Одно из возможных ее решений рассматривается в настоящей книге. Идея его состоит в образовании в воздушном зазоре машины вращающегося магнитного поля — эллиптического или кругового.

В эллиптическом поле кроме вращающего момента M_1 возникает тормозной момент M_2. В круговом поле тормозной момент отсутствует.

Для получения кругового вращающегося поля должны быть соблюдены определенные условия. При двух статорных обмотках магнитное поле становится круговым, если их МДС, равные по значению, сдвинуты в пространстве на 90° (электрических) и во времени. Заметим, что под МДС понимают произведение тока обмотки на число ее витков (эффективных). Ось МДС всегда совпадает с осью обмотки.

Рассмотрим схему включения трехфазного двигателя в однофазную сеть (рис. 8, *а*). Одна обмотка статора образована фазой *С1—С4*, другая состоит из двух последовательно соединенных фаз: *С2—С5*, *С3—С6*. Назовем первую обмотку **пусковой**, а вторую **рабочей**, или **главной**. Стрелками *1—3* (рис. 8, *б*) для некоторого момента времени условно показаны направления и значения пульсирующих МДС отдельных фаз двигателя. Ось МДС главной обмотки (стрелка *4*) находят по правилу параллелограмма (рис. 8, *в*). Как видно, ось МДС глав-

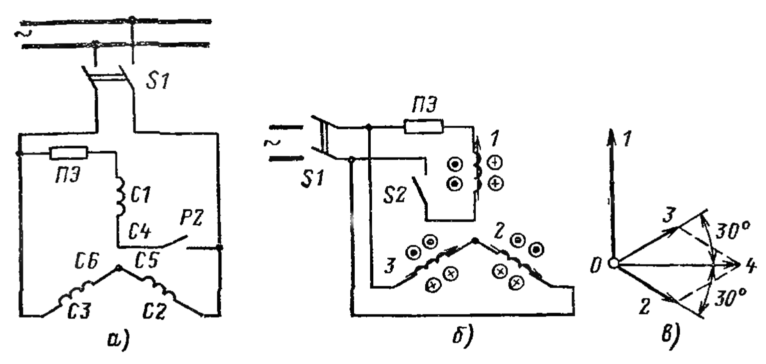


Рис. 8. Образование пространственного угла сдвига между осими главной и пусковой обмоток однофазного двигателя

ной фазы оказывается сдвинутой относительно осей МДС статорных обмоток *С2—С5*, *С3—С6* на 30°. При этом между осями МДС главной и пусковой обмоток создается пространственный сдвиг, равный 90°. При соединении обмоток двигателя треугольником получается тот же результат.

Для получения сдвига МДС, создаваемых токами обмоток во времени, в цепь пусковой обмотки включают активное сопротивление, индуктивное сопротивление или конденсатор. В первом и втором случаях создается эллиптическое вращающееся поле, так как сдвиг во времени между токами обмоток получается значительно меньше $^1/_4$ периода. К достоинству этих способов пуска относятся простота и относительно невысокая стоимость пусковых элементов.

Если в качестве фазосдвигающего элемента использовать конденсатор, то можно получить вращающееся

магнитное поле, близкое к круговому, а в некоторых случаях и круговое.

Пуск двигателя в ход производится следующим образом. При замкнутом рубильнике *S2* (рис. 8, *б*) включается рубильник *S1*. По достижении частоты вращения, близкой к синхронной, цепь пусковой обмотки с пусковым элементом *ПЭ* размыкается вручную или автоматически, например, с помощью центробежного выключателя. Под напряжением сети на время работы остается только главная фаза.

Сравнение различных способов пуска показало, что пусковой ток для одного и того же значения момента получается наименьшим при пуске с помощью включения конденсатора. С уменьшением пускового тока уменьшаются колебания напряжения в линии, что приводит к улучшению условий пуска вследствие известной пропорциональности между вращающим моментом асинхронного двигателя и квадратом приложенного напряжения.

Для одинаковых пусковых токов начальный вращающий момент двигателя с конденсатором в цепи пусковой обмотки значительно превосходит момент, получаемый при включении активного сопротивления или индуктивности.

3. КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Выше указывалось, что пусковые характеристики при однофазном включении двигателя становятся наиболее благоприятными, когда в качестве пускового элемента используется конденсатор. Для улучшения рабочих характеристик конденсатор определенной емкости оставляют включенным на весь рабочий период.

Асинхронный двигатель, работающий от сети однофазного тока, с конденсатором в его цепи называется **конденсаторным.**

По теории и расчету конденсаторного двигателя опубликовано значительное число работ в отечественной и иностранной литературе. Еще в 1934 г. один из видных советских ученых — академик В. С. Кулебакин, рассмотрев основные свойства конденсаторного двигателя, указал на широкие возможности его применения в народном хозяйстве и, в частности, выдвинул идею его использования в электрической тяге.

Данные теоретических и экспериментальных исследований конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками и специального исполнения нашли отражение в работах М. Крондля, В. Шуйского, И. М. Эдельмана, Г. Б. Меркина, Н. М. Булаева, В. Е. Розенфельда, М. И. Крайцберга, Б. Н. Тихменева, Х. Клауснитцера, О. А. Некрасова, А. Г. Мирера, Ю. С. Чечета, Ф. М. Юферова и др.

Фундаментальные исследования вопросов теории и особенностей различных схем конденсаторного двигателя принадлежат А. И. Адаменко.

Внимание исследователей продолжают занимать вопросы дальнейшего развития методики проектирования и расчета конденсаторных двигателей специального исполнения. Вместе с тем большой интерес вызывает изучение возможностей улучшения эксплуатационных свойств асинхронного двигателя трехфазного тока, работающего в схеме однофазного включения с конденсатором. Сказанное в значительной мере объясняется расширением областей применения конденсаторного двигателя. Каковы же его характерные особенности?

По сравнению со схемой однофазного включения (см. рис. 5), конденсаторный двигатель развивает бóльшую полезную мощность. Ее значение достигает 65—85 % номинальной мощности, указанной на щитке. Конденсаторный двигатель как асинхронный короткозамкнутый очень прост по устройству и надежен в работе. Его питание осуществляется от двухпроводной сети.

Ценным свойством конденсаторного двигателя является высокий коэффициент мощности, который может приобретать значения, практически равные единице. В последнем случае двигатель потребляет из сети ток, пропорциональный только активной мощности, так как источником реактивной мощности для него является конденсатор.

Пусковая и рабочая емкости при данном напряжении сети и принятой схеме включения зависят от мощности двигателя. С увеличением мощности они возрастают. Начиная с некоторой мощности, применение конденсаторных двигателей экономически уже не оправдывается из-за относительно высокой стоимости конденсаторов. Предельной мощностью конденсаторного двигателя общего назначения следует принять номинальную мощность 1,5 кВт, обозначенную на щитке.

Таблица 3

Номинальная мощность, кВт	Высота оси вращения, мм	Синхронная частота вращения, об/мин	Степень защиты
0,09	50	3000	IP 44
0,12	50		
0,18	56		
0,25	56		
0,37	63		
0,55	63		
0,75	71		
1,1	71		
1,5	80		
0,06	50	1500	
0,09	50		
0,12	56		
0,18	56		
0,25	63		
0,37	63		
0,55	71		
0,75	71		
1,1	80		
1,5	80		
0,18	63	1000	
0,25	63		
0,37	71		
0,55	71		
0,75	80		
1,1	80		
0,25	71	750	
0,37	80		
0,55	80		
0,75	90		
1,1	90		
1,5	100		

Поясним сказанное на примере двигателя серии 4А в защищенном исполнении с синхронной частотой вращения 1500 об/мин. Стоимость конденсаторов типа КБГ-МН, образующих рабочую емкость, при мощности двигателя 1 кВт примерно равна стоимости двигателя, т. е. составляет приблизительно 100 %. Для мощностей 1,5 и 10 кВт соответственно получаем 140 и 270 % стоимости двигателей.

Мощность от нескольких сотен ватт до 1,5 кВт имеет огромное число асинхронных трехфазных двигателей, применяемых в народном хозяйстве В связи с освоением отечественными заводами технологии изготовления высококачественных конденсаторов становится реальной возможность широкого использования конденсаторных двигателей, особенно в условиях сельскохозяйственного производства.

Шкала номинальных мощностей электродвигателей* серии 4А сельскохозяйственного назначения приведена в табл. 3.

Для работы в средах повышенной влажности (птицеводческие помещения, животноводческие фермы) выпускают электродвигатели серии 4А климатического исполнения У2, которые отличаются от двигателей основного исполнения У3 влагоморозостойкой изоляцией и защитными покрытиями.

Кроме сельскохозяйственных электроустановок конденсаторный двигатель может также найти применение в промышленности и быту для привода механизмов и машин небольшой мощности.

Отличительным элементом конденсаторного двигателя является конденсатор. Технические данные конденсаторов, пригодных для использования в цепи конденсаторного двигателя, приведены в § 4.

4. КОНДЕНСАТОРЫ

Конденсаторы (ГОСТ 21415—75*, 1282—79*Е, 23232—78*Е) применяются в самых различных областях электротехники. В технике сильных токов их используют преимущественно для улучшения коэффициента мощности. Они необходимы также для пуска и работы конденсаторных двигателей.

Электрические свойства конденсаторов в значительной мере зависят от рода диэлектрика, заключенного между обкладками. По этому признаку различают воздушные конденсаторы, бумажные, слюдяные, масляные, электролитические и т. д. Каждый конденсатор рассчитан на определенное рабочее (номинальное) напряже-

---

* Конденсаторные двигатели специального исполнения (например, электротяговые двигатели рудничных электровозов) могут иметь значительно большую мощность. В книге такие двигатели не рассматриваются.

ние. Рабочим называется напряжение, при котором конденсатор может работать длительно. Номинальное напряжение и емкость указываются в паспортных данных конденсатора.

Конденсатор типа КБГ-МН предназначен для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от —60 до +70 °С и выполняется постоянной емкости. Тип конденсатора КБГ-МН обозначает: конденсатор бумажный, герметический, в металлическом прямоугольном корпусе, нормальный.

Пример. Конденсатор типа КБГ-МН, 2 В, 1000 В, 4 мкФ±10 %, т. е конденсатор бумажный, с двумя изолированными выводами (2 В) на номинальное напряжение постоянного тока 1 кВ, емкостью 4 мкФ, с допустимым отклонением ±10 %.

Бумажные конденсаторы выдерживают в течение 4 ч удвоенное рабочее напряжение, в течение 10 с — утроенное рабочее напряжение.

По допустимому отклонению емкости от номинальной конденсаторы выпускаются трех классов точности:

Класс точности	*I*	*II*	*III*
Допустимое отклонение от номинального, %	±5	±10	±20

Основные технические данные конденсаторов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина×высота×ширина), мм	Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм
400	1	45×25×58	600	4	65×35×108
400	2	45×25×58	600	6	65×60×108
400	4	65×35×93	1000	1	45×30×78
400	6	65×35×108	1000	2	65×35×93
400	8	65×60×108	1000	4	65×60×108
600	1	45×30×58	1500	1	45×30×108
600	2	45×30×108	1500	2	65×60×108

При работе конденсаторов в цепях переменного тока допустимое напряжение не должно превышать значений, указанных в табл. 5.

Таблица 5

Номинальное напряжение постоянного тока, В	Допустимое напряжение, В, переменного тока для частоты				Номинальное напряжение постоянного тока, В	Допустимое напряжение, В, переменного тока для частоты			
	50 Гц		500 Гц			50 Гц		500 Гц	
	Емкость конденсатора, мкФ					Емкость конденсатора, мкФ			
	До 2	4—10	До 2	4—10		До 2	4—10	До 2	4—10
400	250	200	125	75	1000	400	350	200	150
600	300	250	150	100	1500	500	—	250	—

Пример. Допустимое напряжение конденсаторов типов КБГ-МН и БГТ (см. табл. 6) 6 мкФ, 600 В, используемых в сети переменного тока 50 Гц, составляет не 600, а 250 В.

Конденсаторы типа БГТ (бумажные герметические термостойкие) предназначены для работы в цепях постоянного, переменного и пульсирующего токов в интервале температур от —60 до +100 °С и выполняются постоянной емкости. Конденсаторы типа БГТ по отклонению емкости от номинальной изготовляются трех классов точности, как и конденсаторы типа КБГ-МН.

В табл. 6 приведены основные технические данные конденсаторов.

Таблица 6

Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм	Рабочее напряжение постоянного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм
400	1	45×30×54	600	2	65×30×112
400	2	45×60×54	600	4	65×50×112
400	4	65×35×112	600	6	65×70×112
400	6	65×50×112	1000	1	45×80×54
400	8	65×70×112	1000	2	65×45×112
600	1	45×45×54	1000	4	65×80×112

Конденсаторы типа МБГЧ предназначены для работы в цепях переменного или пульсирующего тока в интервале температур от —60 до +70 °С и выполняются постоянной емкости в корпусах прямоугольной формы. Конденсаторы МБГЧ — металлобумажные (из металлизирован-

ной бумаги), герметизированные, частотные. По отклонению емкости от номинальной они изготовляются II и III классов точности.

Основные технические данные конденсаторов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Рабочее напряжение переменного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм	Рабочее напряжение переменного тока, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры корпуса (длина×ширина×высота), мм
250	1	46×11×50	500	2	46×41×50
250	2	46×16×50	500	4	69×34×115
250	4	46×26×50	750	1	46×51×50
250	10	46×56×50	750	2	69×34×115
500	1	46×21×50			

Конденсаторы типа ЭП (электролитические пусковые) предназначены для работы в цепях переменного тока в интервале температур от —40 до +60 °С и выполняются постоянной емкости на номинальные рабочие напряжения 175 и 300 В по III классу точности. Конденсаторы допускают до 30 включений в 1 ч продолжительностью включения до 3 с.

Номинальные значения емкости при напряжении 175 В составляют 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 и 100 мкФ, а при напряжении 300 В — 1,5, 3, 5, 8, 10, 15, 20 и 30 мкФ.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Принципиальные электрические схемы конденсаторного двигателя с тремя обмотками на статоре показаны на рис. 9.

Как и в случае трехфазного включения, обмотки статора могут быть соединены в звезду (рис. 9, *а*) или треугольник (рис. 9, *б*). Напряжение сети подводится к двум выводам двигателя, соответствующим началам двух фаз. Между одним из них и выводом, соответствующим началу третьей фазы, включаются конденсаторы *1* и *2*. Последний необходим для увеличения пускового момента.

Пусковая емкость

$$C_п = C_р + C_о, \qquad (11)$$

где $C_р$ — рабочая емкость; $C_о$ — отключаемая емкость.

После пуска двигателя конденсатор *2* отключается и в схеме остается только конденсатор *1* с рабочей емкостью. Выводы обмоток, к которым подведено напряжение сети, назовем входными. Очевидно, что возможны три комбинации образования входных выводов: *С1—С2*, *С1—С3*, *С3—С2*. Положим, что использована первая из них. Тогда переключение на вторую комбинацию (*С1—С3*) приведет к изменению направления вращения (реверсированию).

Как показывает анализ, в схемах включения на рис. 9, *а* и *б* устанавливается определенный порядок следова-

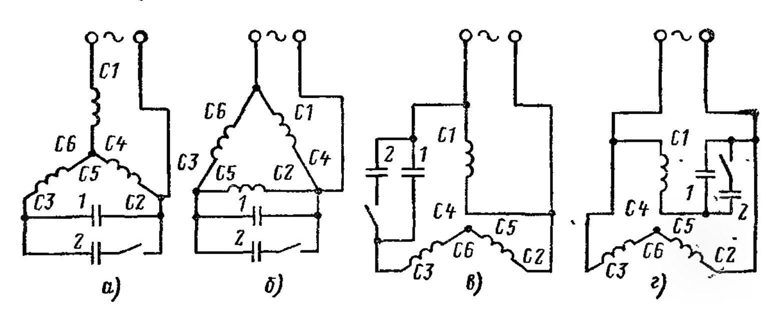


Рис. 9. Принципиальные электрические схемы конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками:

1 — рабочий конденсатор; *2* — отключаемый конденсатор

ния токов статорных обмоток двигателя, а именно I_A—I_B—I_C. Этому порядку соответствует также вполне определенное направление вращения поля. Если произвести отмеченное переключение, то токи статорных обмоток будут следовать в обратном порядке (I_A—I_C—I_B). Направление вращения изменяется при этом на противоположное. Порядок следования токов фаз нетрудно определить графическим путем — с помощью векторных диаграмм, которые рассматриваются в § 11.

В других вариантах схем включения (рис. 9, *в* и *г*) из трех фаз исходного трехфазного двигателя образованы две обмотки. Одну из них составляют две фазы, соединенные последовательно. Обмотку, в цепи которой находится конденсатор, условимся называть **конденсаторной фазой**, другую обмотку, включаемую на напряжение сети, — **главной фазой**.

Соединение выводов на коробке контактных зажимов

щитка применительно к схеме включения, приведенной на рис. 9, *г*, для одного направления вращения показано на рис. 10, *а* и для другого — на рис. 10, *б*. Реверсирование двигателя достигается изменением порядка следования токов главной и конденсаторной фаз. В данном случае с этой целью производится переключение конденсаторной фазы (рис. 10).

В схеме включения конденсаторного двигателя используется следующая аппаратура управления и защиты: двухполюсный и однополюсный рубильники, реле и пре-

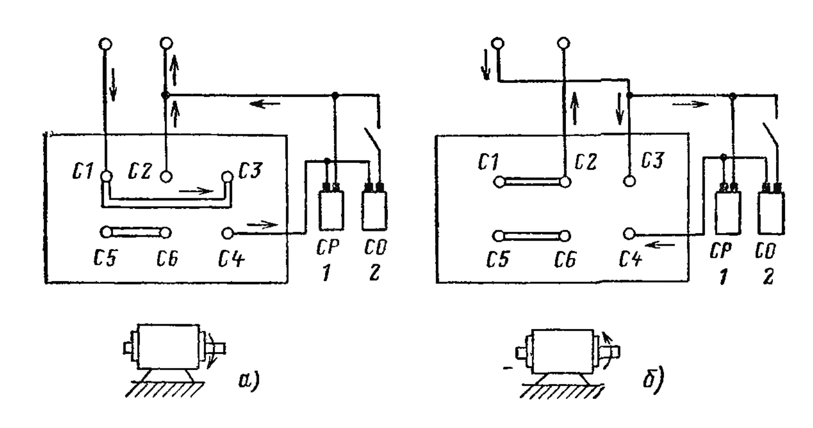


Рис. 10. Соединение выводов обмоток статора на щитке конденсаторного двигателя для схемы рис. 9, *г*

дохранители. Через двухполюсный рубильник к двигателю подводится питание от сети. Для включения и отключения пускового конденсатора применяются однополюсный рубильник, центробежное реле или специальное реле, токовая обмотка которого включается в цепь главной фазы. Предохранитель защищает двигатель от коротких замыканий (КЗ).

В схеме конденсаторного двигателя, так же как и при трехфазном включении, можно использовать магнитный пускатель. В этом случае легко осуществляются дистанционное управление, защита от самозапуска (при сильном снижении напряжения сети двигатель отключается и самопроизвольно включиться не может), а также защита от перегрузки с помощью тепловых реле магнитного пускателя.

6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ И ПУСКОВОЙ ЕМКОСТИ

Номинальными напряжением и током конденсаторного двигателя условимся называть **фазные** значения этих величин, указанные в паспорте машины. Например, на щитке трехфазного асинхронного двигателя обозначено: 1 кВт, 127/220 В, 7,3/4,2 А, 1410 об/мин, КПД=78,5 %, $\cos\varphi=0{,}79$. В зависимости от напряжения сети обмотки статора при трехфазном включении соединяются в треугольник (при напряжении 127 В) либо в звезду (при напряжении 220 В). Соответственно ток двигателя при полезной мощности 1 кВт составляет 7,3 А (соединение треугольником) или 4,2 А (соединение звездой). Однако независимоот схемы соединения фазными значениями напряжения и тока в приведенном примере остаются 127 В и 4,2 А. Их мы и будем считать номинальными при использовании двигателя в качестве конденсаторного.

Емкость и реактивное сопротивление конденсатора находятся в обратной зависимости. Чем меньше емкость, тем больше сопротивление. Изменение емкости сопровождается изменением тока. Из этого следует, что ток конденсаторной фазы (рис. 9, *в* и *г*) может оказаться меньше или больше номинального. В первом случае мощность двигателя недоиспользуется, во втором — возникает опасность недопустимого перегрева обмоток и повышения напряжений на отдельных участках схемы (на конденсаторной фазе, на конденсаторе). Особенно неблагоприятным оказывается явление резонанса напряжений, при котором ток конденсаторной фазы во много раз превышает номинальное значение, а возникающие перенапряжения представляют опасность для персонала и, кроме того, могут вызвать пробой изоляции обмотки или конденсатора.

В практике эксплуатации конденсаторного двигателя правильный выбор рабочей емкости имеет поэтому весьма большое значение.

Рабочая (постоянно включенная) емкость выбрана правильно, если фазные токи и напряжения при нагрузке становятся практически номинальными. Развиваемая полезная мощность при этом принимается за номинальную мощность двигателя. Удовлетворяющую отмеченным условиям рабочую емкость будем обозначать через $C_{р,\,ном}$. Определение рабочей емкости для любой произвольной нагрузки рассматривается в § 12.

Следует отметить, что полная симметрия напряжений и токов конденсаторного двигателя не достигается, особенно для схем на рис. 9, *а* и *б*. Тем не менее любой схеме включения соответствует одна вполне определенная емкость, при которой токи в обмотках нагруженного двигателя несущественно отличаются от номинальных.

Рабочая емкость пропорциональна мощности двигателя (номинальному току) и обратно пропорциональна напряжению. Применительно к рассмотренным схемам включения конденсаторного двигателя для частоты 50 Гц рабочая емкость приближенно может быть определена по следующим соотношениям:

для схемы рис. 9, *а*

$$C_{р,ном} \approx 2800 \frac{I_{ном}}{U}; \quad (12)$$

для схемы рис. 9, *б*

$$C_{р,ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U}; \quad (13)$$

для схемы рис. 9, *в*

$$C_{р,ном} \approx 1600 \frac{I_{ном}}{U}; \quad (14)$$

для схемы рис. 9, *г*

$$C_{р,ном} \approx 2740 \frac{I_{ном}}{U}, \quad (15)$$

где $I_{ном}$ — номинальный ток, А; U — напряжение сети, В.

Таким образом, исходными данными, по которым определяется $C_{р,ном}$, являются номинальный ток двигателя и напряжение сети.

Пример. Определить рабочую емкость для двигателя 0,25 кВт, 127/220 В, 2,1/1,15 А, если двигатель включен по схеме, приведенной на рис 9, *а*, а напряжение сети 220 В Как видно, номинальный ток конденсаторного двигателя равен 1,15 А. На основании (12) находим.

$$C_{р\,ном} \approx 2800 \frac{I_{ном}}{U} = 2800 \frac{1,15}{220} \approx 14,6 \text{ мкФ}.$$

Принимаем $C_{р\,ном} = 15$ мкФ

При определении пусковой емкости исходят прежде всего из требований создания необходимого пускового момента. Если по условиям работы электропривода пуск

двигателя происходит без нагрузки, то пусковая емкость обычно принимается равной рабочей. В этом случае схема включения упрощается.

Пуск под нагрузкой совершается при наличии в цепи двигателя и рабочей, и отключаемой емкостей. Увеличение отключаемой емкости приводит к возрастанию пускового момента, и при некотором определенном ее значении момент достигает своего наибольшего значения. Дальнейшее увеличение емкости приводит к обратному результату: пусковой момент начинает уменьшаться.

Наибольший пусковой момент зависит не только от емкости, но и от схемы включения двигателя. При соединении обмоток звездой (рис. 9, *а*) или треугольником (рис. 8, *б*) пусковой момент не превосходит номинального при трехфазном включении. Для других схем (рис. 9), *в* и *г*) наибольший пусковой момент может в несколько раз превышать значение номинального момента, но его реализация сопряжена с появлением значительных перенапряжений в цепи конденсаторной фазы.

Однако на практике не возникает необходимости в создании такого большого момента при пуске.

Исходя из условия получения пускового момента, близкого к номинальному (при трехфазном включении), необходимо иметь пусковую емкость, примерное значение которой равно:

$$C_{п} \approx (2{,}0 \div 3)\, C_{р.ном}\,. \qquad (16)$$

Отключаемые конденсаторы работают непродолжительное время (всего несколько секунд за весь период включения или доли секунды). Это позволяет использовать при пуске наиболее дешевые электролитические конденсаторы типа ЭП, специально предназначенные для этой цели

7. НАПРЯЖЕНИЕ НА КОНДЕНСАТОРЕ

В § 6 было рассмотрено определение рабочей и пусковой емкостей для различных схем включения конденсаторного двигателя. Не менее важным является выбор конденсаторов по напряжению. Действительно, установка конденсаторов с «запасом» по напряжению, т. е. с превышением номинального напряжения переменного тока над тем, под которым они находятся в схеме, приводит к недоиспользованию их реактивной мощности. Кроме

того, стоимость конденсаторов с повышением номинального напряжения увеличивается. С другой стороны, эксплуатация конденсаторов под напряжением, превышающим номинальное, приводит к преждевременному выходу их из строя.

Мы будем сравнивать напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке с напряжением сети.

Для первых двух схем включения конденсаторного двигателя (рис. 9, *а* и *б*) без существенной погрешности может быть принято равенство

$$U_{к,ном} \approx U, \tag{17}$$

где $U_{к,ном}$ — напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке (действующее значение); U — напряжение сети.

Связь между напряжениями при включении двигателя по схеме, приведенной на рис. 9, *г*, выражается зависимостью

$$U_{к,ном} \approx 1{,}15U. \tag{18}$$

Из последнего выражения видно, что в данном случае напряжение на конденсаторе на 15 % выше напряжения сети.

Превышение напряжения конденсатора над напряжением сети для схемы, приведенной на рис. 9, *в*, оказывается еще бо́льшим:

$$U_{к,ном} \approx 2U. \tag{19}$$

Напряжение на конденсаторе, как будет показано ниже, при постоянной рабочей емкости и данном напряжении сети не остается неизменным. Увеличиваясь с уменьшением нагрузки, оно достигает наибольшего значения при холостом ходе, составляя (1,2—1,25) $U_{к,ном}$.

При работе двигателя с нагрузкой, меньшей номинальной, рекомендуется пользоваться соответственно следующими соотношениями:

для схемы рис. 9, *а* и *б*

$$U_{к,р} \approx 1{,}15U; \tag{20}$$

для схемы рис. 9, *г*

$$U_{к,р} \approx 1{,}3U; \tag{21}$$

для схемы рис. 9, *в*

$$U_{к,р} \approx 2{,}2U, \tag{22}$$

где $U_{к,р}$ — расчетное напряжение конденсатора.

Конденсатор выбран правильно, если его номинальное напряжение переменного тока равно расчетному или несколько больше его.

Пример. Двигатель мощностью 1 кВт, 127/220 В включен по схеме, приведенной на рис. 9, *г*. Напряжение сети 220 В, рабочая емкость 52 мкФ состоит из конденсаторов типа КБГ-МН по 2 мкФ в каждом.

Требуется определить рабочее напряжение конденсаторов.

Расчетное напряжение $U_{к,р}$ вычисляем по (21):

$$U_{к,р} \approx 1,3U = 1,3 \cdot 220 = 286 \text{ В}.$$

По табл. 5 для конденсаторов до 2 мкФ при частоте 50 Гц находим, что допустимому напряжению переменного тока 300 В (ближайшее большее к 286 В) соответствует номинальное напряжение постоянного тока 600 В. Итак, выбираем конденсаторы с рабочим напряжением 600 В

Рабочую емкость комплектуем из 26 конденсаторов по 2 мкФ каждый.

8. ВЫБОР СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ

Выбор схемы включения конденсаторного двигателя производится с учетом напряжения сети и данных двигателя по напряжению.

Схема выбрана правильно, если любая из обмоток статора трехфазного двигателя при номинальной нагрузке оказывается под напряжением, равным номинальному, или близким к нему. При этом имеется в виду, что установленная рабочая емкость определена по соотношению, соответствующему схеме.

Кроме согласования данных по напряжению, оцениваются особенности возможных схем. Заметим, что в отдельных конкретных случаях выбор вариантов схем может быть ограничен.

Пример. Статорные обмотки двигателя электрорубанка 0,62 кВт, 220 В, 1,88 А соединены в звезду, причем нулевая точка недоступна. Очевидно, что как конденсаторный он может иметь только одну схему включения, изображенную на рис. 9, *а*. Источником питания для двигателя служит сеть однофазного тока напряжением 220 В.

Рассмотрим особенности конденсаторного двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 9, *а*. Назовем обмотку *С1—С4* главной фазой, через которую проходит весь ток двигателя. Обмотку *С3—С6*, соединенную после-

довательно с конденсатором, назовем конденсаторной фазой и третью обмотку *С2—С5* — вспомогательной фазой.

Изменение токов этих фаз с изменением скольжения оказывается совершенно различным. Если ток главной фазы с уменьшением нагрузки (скольжения) уменьшается, то ток конденсаторной фазы, наоборот, возрастает, достигая наибольшего значения при холостом ходе.

Вспомогательная фаза при холостом ходе находится в генераторном режиме — ее активная мощность отрицательна. С возрастанием нагрузки вспомогательная фаза переходит в двигательный режим. При этом ее ток, уменьшаясь, достигает некоторого минимального значения и затем начинает увеличиваться.

Активная мощность по фазам распределяется неравномерно. При номинальной нагрузке главная фаза развивает примерно такую же мощность, как конденсаторная и вспомогательная, вместе взятые. Равенства токов всех фаз номинальному не достигается. Поэтому под номинальной здесь имеется в виду такая нагрузка, при которой токи двух фаз равны номинальному, а ток третьей фазы составляет 70—85 % номинального. Это определение относится и к случаю соединения обмоток статора треугольником.

Характерными особенностями схемы являются относительно небольшие значения пускового момента и напряжения на конденсаторе.

В другой схеме включения (рис. 9, *б*) обмотки двигателя соединены в треугольник. По аналогии с предыдущей схемой здесь также можно различить главную, конденсаторную и вспомогательную фазы. Вспомогательной назовем фазу *С1—С4*, к которой подведено напряжение сети. Обмотка *С2—С5* с параллельно присоединенным конденсатором представляет собой конденсаторную фазу, и третья обмотка *С3—С6* — главную фазу.

Характер изменения токов в фазах с изменением нагрузки остается таким же, как и при соединении обмоток статора в звезду.

Пример. В § 6 для двигателя, соединенного в звезду, при напряжении сети 220 В получена рабочая емкость $C_{р,ном} \approx 14{,}6$ мкФ. Напряжение на конденсаторе в соответствии с (17) равно $U_{к,ном} \approx U = 220$ В.

При напряжении сети 127 В обмотки двигателя соединяются в треугольник по схеме рис. 9, *б*. Для нее в соответствии с (13)

$$C_{р,ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{1,15}{127} = 43,5 \text{ мкФ}.$$

Сравнивая емкости 43,5 и 14,6 мкФ, видим, что для схемы рис. 9, *б* рабочая емкость увеличивается в 3 раза. Напряжение на конденсаторе определяется по (17):

$$U_{к,ном} \approx U = 127 \text{ В}.$$

Активная мощность между обмотками распределяется неравномерно. Наибольшую мощность при номинальной нагрузке развивают главная и вспомогательная фазы.

Относительно небольшой пусковой момент составляет одно из характерных свойств этой схемы. Особенности ее по сравнению с предыдущей состоят в том, что для одного и того же двигателя напряжение на конденсаторе уменьшается в $\sqrt{3}$ раз, а емкость рабочего конденсатора увеличивается в 3 раза.

Проведенное сравнение показывает, что первая схема (рис. 9, *а*) является предпочтительнее, так как ее технические и экономические показатели лучше: меньше емкость и габариты батареи конденсаторов, ниже стоимость ее установки. Однако ее применение не всегда оказывается возможным. Если напряжение сети равно номинальному напряжению фазы, обмотки двигателя соединяются в треугольник (рис. 9, *б*) или как показано на рис. 9, *в*.

Обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя в схемах рис. 9, *в* и *г* образуют две фазы — главную и конденсаторную.

Ток главной фазы возрастает с нагрузкой, конденсаторной — уменьшается. Двигатель работает с номинальной нагрузкой, когда по обеим обмоткам проходит номинальный ток. При этом обратное магнитное поле становится несущественным, вследствие этого использование мощности двигателя улучшается.

Активные мощности главной и конденсаторной фаз, соответствующие номинальной нагрузке, примерно одинаковы. С уменьшением нагрузки происходит некоторое возрастание мощности конденсаторной фазы. Мощность главной фазы довольно резко уменьшается и на холостом ходу приобретает отрицательное значение: главная фаза переходит в режим асинхронного генератора с конденсаторным возбуждением, работающего параллельно с се-

тью. С появлением нагрузки на валу главная фаза переходит в двигательный режим.

Достоинствами схем рис. 9, *в* и *г* по сравнению с рассмотренными выше являются возможность получения значительного пускового момента и лучшее использование мощности двигателя. Сравним эти схемы.

Пусть питающая сеть однофазного тока, как это часто встречается на практике, имеет напряжение 220 В. Очевидно, что если двигатель выполнен на напряжения 220/380 В, он включается по схеме, приведенной на рис. 9, *в* или по схеме рис. 9, *г*, если номинальные напряжения двигателя 127/220 В.

Напряжение на конденсаторе при номинальной нагрузке составит: для схемы рис. 9, *в* $U_{к, ном} \approx 2U = 2 \cdot 220 = 440$ В, а для схемы рис. 9, *г* $U_{к,ном} \approx 1{,}15U = 1{,}15 \cdot 220 = 253$ В.

Между напряжениями на конденсаторе в том и другом случае имеется существенная разница. Повышение напряжения связано с некоторым увеличением стоимости конденсаторов и уменьшением безопасности обслуживания. Кроме того, вследствие возрастания индуктивного сопротивления конденсаторной фазы при включении двигателя по схеме рис. 9, *в* возникает опасность перенапряжения, особенно при пуске двигателя.

Схема рис. 9, *г*, выгодно отличаясь от предыдущей, заслуживает предпочтения. Она является наиболее рациональной схемой включения конденсаторного двигателя. Ниже этот вывод будет обоснован с помощью векторных диаграмм токов и напряжений.

Заметим, что двигатель на напряжения 127/220 В также может быть включен по схеме рис. 9, *в*, но на напряжение сети 127 В. Если же номинальные напряжения двигателя равны 220/380 В, а напряжение питающей сети равно 220 В, то здесь вместо схемы включения конденсаторного двигателя с двумя обмотками (рис. 9, *в*) следует выбрать схему с соединением фаз в треугольник (рис. 9, *б*), несмотря на увеличение емкости конденсаторов.

Пример. Имеются конденсаторы типов МБГЧ и ЭП. Двигатель 1 кВт, 220/380 В, с номинальным током фазы 2,4 А включается на напряжение сети 220 В. Требуется определить значение рабочей и пусковой емкостей, а также расчетное напряжение на конденсаторах и напряжение при номинальной нагрузке.

Схема рис. 9, *б*

Рабочая емкость по (13)

$$C_{р,ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{2,4}{220} = 52,5 \text{ мкФ}.$$

Номинальное напряжение на конденсаторе по (17)

$$U_{к\ ном} \approx U = 220 \text{ В}.$$

Расчетное напряжение конденсатора по (20)

$$U_{к,р} \approx 1,15U = 1,15 \cdot 220 \approx 250 \text{ В}.$$

По табл. 7 выбираем 13 конденсаторов МБГЧ емкостью по 4 мкФ с рабочим напряжением 250 В.

Отключаемую емкость принимаем по (16) равной

$$C_о \approx 2C_{р,ном} = 105 \text{ мкФ}$$

и выбираем для нее пять конденсаторов типа ЭП по 20 мкФ на 300 В.

Схема рис. 9, *в*

Рабочая емкость по (14)

$$C_{р,ном} \approx 1600 \frac{I_{ном}}{U} = 1600 \frac{2,4}{220} \approx 18 \text{ мкФ}.$$

Номинальное напряжение на конденсаторе по (19)

$$U_{к,ном} \approx 2U = 2 \cdot 220 = 440 \text{ В}.$$

Оно может быть найдено также умножением номинального тока на реактивное сопротивление конденсатора x_C:

$$U_{к,ном} = I_{ном} x_C = I_{ном} \frac{10^6}{\omega C},$$

где $\omega = 2\pi f$ — угловая частота переменного тока; C — емкость, мкФ; f — частота напряжения сети, Гц.

Произведя вычисления для частоты $f=50$ Гц, получим:

$$U_{к,ном} = 2,4 \frac{10^6}{314 \cdot 18} = 425 \text{ В}.$$

Расхождение с данными, полученными по (19), составляет примерно 4 %, что для практических расчетов вполне допустимо.

Расчетное напряжение на конденсаторе по (22)

$$U_{к,р} \approx 2,2U = 2,2 \cdot 220 = 484 \text{ В}.$$

По табл. 7 выбираем девять конденсаторов МБГЧ по 2 мкФ на рабочее напряжение 500 В.

Для отключаемой емкости конденсаторы типа ЭП не подходят по напряжению. Поэтому отключаемую емкость составляем из конденсаторов типа МБГЧ, приняв ее равной

$$C_о \approx 1,5C_{р.ном} = 1,5 \cdot 18 = 27 \text{ мкФ}.$$

По табл. 7 выбираем семь конденсаторов по 4 мкФ на рабочее напряжение 500 В.

Приведенный пример подтверждает целесообразность включения конденсаторного двигателя при отмечеииых условиях по схеме рис. 9, *б*.

Пример. Выбрать схему включенни конденсаторного двигателя 0,6 кВт, 127/220 В с номинальным током фазы 2,5 А, если напряжение сети равно 127 В. Определить рабочую емкость и выбрать конденсаторы типа КБГ-МН.

Сопостанление приведенных данных по напряжеиию показывает, что включение двигателя возможно по схемам рис. 9, *б* или *в*. Произведем вычисления для обеих схем.

Схема рис. 9, *б*

Рабочая емкость по (13)

$$C_{р,ном} \approx 4800 \frac{I_{ном}}{U} = 4800 \frac{2,5}{127} = 94 \text{ мкФ}.$$

Расчетное напряжение на конденсаторе по (20)

$$U_{к,р} \approx 1,15U = 1,15 \cdot 127 \approx 146 \text{ В}.$$

По табл. 5 для частоты 50 Гц выбираем конденсаторы емкостью от 4 до 10 мкФ с допустимым напряжением переменного тока 220 В, что соответствует номинальному напряжению постоянного тока 400 В, обозначенному на конденсаторах.

По табл. 4 для рабочего напряженни постоянного тока 400 В выбираем 16 конденсаторон по 6 мкФ.

Схема рис. 9, *в*

Рабочаи емкость по (14)

$$C_{р,ном} \approx 1600 \frac{I_{ном}}{U} = 1600 \frac{2,5}{127} = 32 \text{ мкФ}.$$

Расчетное напряжение на конденсаторе по (22)

$$U_{к,р} \approx 2,2U = 2,2 \cdot 127 \approx 280 \text{ В}.$$

По табл. 5 для частоты 50 Гц выбираем конденсаторы емкостью 2 мкФ с допустимым напряженнем переменного тока 300 В, что соответствует номинальному наприжению постоянного тока 600 В.

По табл. 4 для рабочего напряжения постоянного тока 600 В выбираем 16 конденсаторов емкостью по 2 мкФ.

При относительно невысоком напряжении на конденсаторах схема рис. 9, *в* в данном конкретном случае отличается меньшими емкостью и стоимостью конденсаторов.

9. ГРАФИЧЕСКОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНЫХ ВЕЛИЧИН

Величины, изменяющиеся во времени по синусоидальному закону, удобно изображать вращающимися векторами.

Примем, что вектор тока $\overline{OA}$ вращается в положительном направлении, как показано на рис. 11, с постоянной угловой частотой

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \tag{23}$$

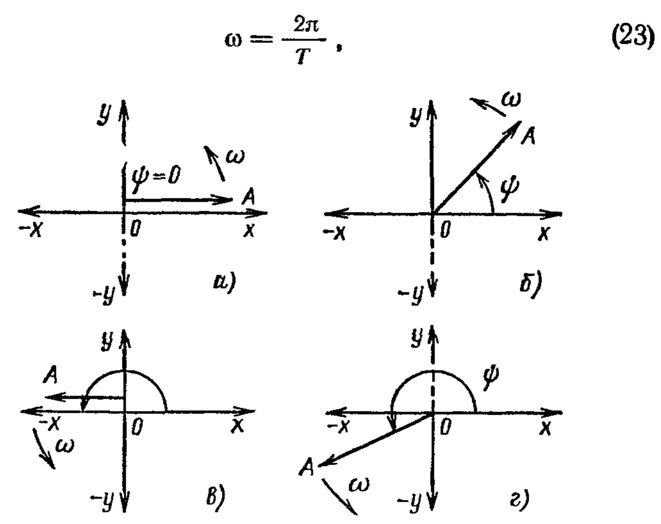


Рис. 11. Положение вращающегося вектора тока в различные моменты времени

где T — период, т. е. время поворота вектора на угол, равный 2π, рад, а длина его в определенном масштабе равна амплитуде I_{max}.

Мгновенные значения тока i, отнесенные к любому произвольно взятому моменту времени t, будут определяться проекциями вектора на вертикальную ось.

Из рассмотрения графиков рис. 11 нетрудно составить представление о характере кривой зависимости тока от времени. Для этого достаточно вектор $\overline{OA}$ мысленно вращать и в течение периода фиксировать мгновенные значения тока через равные промежутки времени, соответствующие одинаковым углам поворота. Исходное по-

ложение вектора, определяемое начальной фазой ψ, выбирается произвольно.

Отложив время периода по горизонтальной оси, можно для каждого момента времени показать значение и направление проекции вектора тока на вертикальную ось. Огибающая мгновенных значений тока представляет собою синусоидальную кривую, уравнение которой записывается в виде

$$i = I_{max} \sin(\omega t + \psi),$$

где ωt — угол поворота вектора за время t; ψ — начальная фаза, соответствующая начальному положению вектора в момент $t=0$.

В течение периода заканчивается полный цикл изменений тока. Во втором и последующих периодах эти изменения повторяются.

Аналогичным образом и синусоидально изменяющееся напряжение можно представить графически в виде вектора, вращающегося в положительном направлении с угловой частотой ω. Векторы тока и напряжения, изображенные в соответствующих масштабах, можно совместить, т. е. показать в одной системе координат.

Совокупность векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся функции времени, называется векторной диаграммой. Векторные диаграммы тока и напряжения используются для получения расчетных соотношений. Обычно они строятся для одного какого-либо момента времени, выбранного произвольно. При этом система координат на график не наносится.

Между амплитудными и действующими значениями синусоидально изменяющихся тока и напряжения существует зависимость

$$I_{max} = \sqrt{2}\, I;$$
$$U_{max} = \sqrt{2}\, U,$$

где I, U — действующие значения тока и напряжения, т. е. значения, которые регистрируются приборами, включенными в цепь переменного тока.

Условимся в дальнейшем пользоваться действующими значениями синусоидальных величин.

Вращающиеся векторы тока и напряжения остаются неподвижными относительно друг друга, так как частоты вращения их равны, а направления вращения совпада-

ют. Между ними в общем случае возникает сдвиг во времени, соответствующий фазовому углу φ. Угол сдвига векторов тока и напряжения зависит от характера нагрузки.

В цепи переменного тока различают: активное сопротивление r; индуктивное сопротивление x_L; емкостное сопротивление x_C. Независимо от числа и комбинации этих сопротивлений в конкретной цепи их всегда можно заменить одним эквивалентным или полным сопротивлением Z.

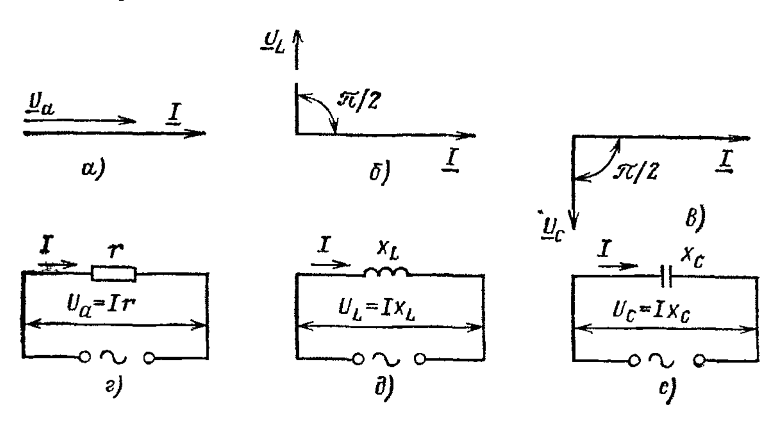


Рис. 12. Векторные диаграммы тока и напряжений (*а—в*), соответствующие схемам включения в цепь переменного тока активного (*г*), индуктивного (*д*) и емкостного (*е*) сопротивлений

Из курса электротехники известно, что ток совпадает по фазе с активным падением напряжения ($\varphi=0$), т. е. с падением напряжения на активном сопротивлении, отстает от индуктивного падения напряжения на угол $\varphi=\pi/2$ и опережает падение напряжения на конденсаторе на угол $\varphi=\pi/2$.

Совместные диаграммы тока и напряжений показаны на рис. 12. При их рассмотрении необходимо помнить, что за направление вращения векторов принято направление против часовой стрелки. Пользуясь отмеченными правилами, нетрудно выполнить построение векторной диаграммы токов и напряжений для приемника, содержащего качественно различные сопротивления.

Представим фазу двигателя переменного тока в виде электрической цепи, состоящей из активного и индуктив-

ного сопротивлений, соединенных последовательно (рис. 13, *а*).

Активное сопротивление отражает процессы преобразования электроэнергии в двигателе, о которых говорилось выше. Наличие индуктивного сопротивления указывает на то, что кроме активной двигатель получает из сети реактивную мощность, необходимую для образования магнитного поля.

Векторная диаграмма тока и напряжений фазы двигателя показана на рис. 13, *б*. Методика ее построения сле-

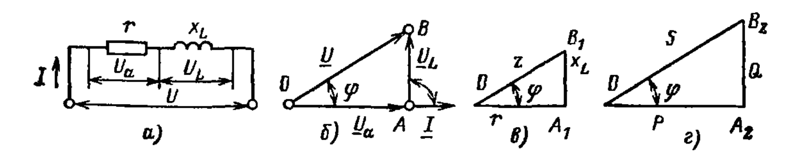


Рис. 13. Включение статорной обмотки двигателя на переменное напряжение:

а — принципиальная схема; *б* — векторная диаграмма тока и напряжений; *в* — треугольник сопротивлений; *г* — треугольник мощностей

дующая. Сначала откладывают в произвольном масштабе вектор тока. В данном случае направление вектора тока принято совпадающим с положительным направлением оси абсцисс. Затем, пользуясь масштабом напряжения, выбранным также произвольно, наносят вектор активного падения напряжения (отрезок *OA*), совпадающего по фазе с током. Далее из точки *A* проводят вектор индуктивного падения напряжения $\underline{AB}$, опережающего ток по фазе на угол $\pi/2$.

Сложив геометрически векторы $\underline{OA}$ и $\underline{AB}$, получают значение и направление вектора напряжения сети $\underline{OB}$, приложенного к фазе двигателя. Как видно, ток фазы двигателя отстает от напряжения, приложенного к фазе, на угол $\varphi<\pi/2$, что и характерно для активно-индуктивной нагрузки.

Треугольник *OAB* называется треугольником напряжений. Из него по известной теореме Пифагора находят:

$$U=\sqrt{U_a^2+U_L^2};\quad U_a=\sqrt{U^2-U_L^2};$$

$$U_L=\sqrt{U^2-U_a^2},$$

или

$$U_а = U\cos\varphi; \quad U_L = U\sin\varphi.$$

Из треугольника напряжений нетрудно получить подобный ему треугольник сопротивлений (рис. 13, *в*) со сторонами

$$r = \frac{U_а}{I}; \quad x_L = \frac{U_L}{I}; \quad Z = \frac{U}{I}.$$

Из треугольника сопротивлений устанавливают, что полное сопротивление цепи связано со своими составляющими соотношениями

$$Z = \sqrt{r^2 + x_L^2};$$

$$r = \sqrt{Z^2 - x_L^2}; \quad x_L = \sqrt{Z^2 - r^2};$$

$$r = Z\cos\varphi; \quad x_L = Z\sin\varphi.$$

Треугольник мощностей (рис. 13, *г*) можно таким же образом получить из треугольника напряжений, так как

$$UI = S; \quad U_а I = P; \quad U_L I = Q.$$

Уравнения связи между полной мощностью и ее составляющими устанавливают аналогично:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad P = \sqrt{S^2 - Q^2}; \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2};$$

$$P = S\cos\varphi; \quad Q = S\sin\varphi.$$

Исходными при построении векторных диаграмм являются векторы тока и напряжения. Если их положение задано, то, как видно из рис. 13, *б*, нетрудно получить составляющие напряжения, приложенного к цепи. Для этого достаточно вектор напряжения $\underline{U}$ спроектировать на взаимно перпендикулярные направления, одно из которых совпадает с направлением вектора тока.

Аналогичным образом вектор тока можно представить в виде геометрической суммы активной $I_а$ и реактивной I_r составляющих. Первая из них совпадает по фазе с вектором напряжения, вторая — перпендикулярна ему.

На диаграмме рис. 14, *а* ток опережает напряжение по фазе на угол $\varphi < \pi/2$, что указывает на активно-емкостный характер нагрузки. Из диаграммы следует:

$$I_а = I\cos\varphi; \quad I_r = I\sin\varphi; \quad I = \sqrt{I_а^2 + I_r^2}.$$

Составляющие тока характеризуют активную и реактивную мощности цепи. Действительно, приведенные выше формулы для мощностей можно представить в виде

$$P = UI\cos\varphi = UI_a; \quad Q = UI\sin\varphi = UI_r,$$

и если $U=\text{const}$, то $P \equiv I_a$, $Q \equiv I_r$.

Условимся считать, что активная мощность положительна, если фазовый угол $\varphi=0$ или $|\varphi|<\pi/2$ (рис. 12, *а*, 13 и 14, *а*). При $\varphi=\pi/2$ она равна нулю (рис. 12, *б, в*) и при $|\varphi|>\pi/2$ (рис. 14, *б*) становится отрицательной.

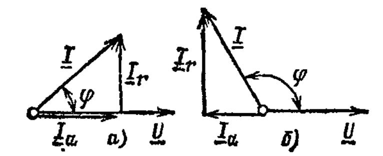


Рис. 14. Разложение вектора тока на активную и реактивную составляющие при $\varphi<\pi/2$ (*а*) и $\varphi>\pi/2$ (*б*)

Знак активной мощности указывает на направление ее передачи. О направлении активной мощности можно судить по фазе активной составляющей тока.

Из сопоставления векторных диаграмм (рис. 14) следует, что если активная составляющая тока совпадает по фазе с напряжением, то активная мощность поступает из сети, т. е. расходуется в цепи приемника. В этом случае активная мощность положительна ($P>0$). Если активная составляющая тока находится в противофазе с приложенным напряжением, то активная мощность отдается в сеть, т. е. является отрицательной ($P<0$).

10. ГРАФИКИ ЗАВИСИМОСТЕЙ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ОТ НАГРУЗКИ

Токи фаз асинхронного трехфазного двигателя при симметричном трехфазном включении возрастают по мере увеличения нагрузки, а фазные напряжения остаются постоянными (предполагается, что питающая сеть обладает достаточно большой мощностью). При этом имеют место равенства

$$I_A = I_B = I_C;$$

$$U_A = U_B = U_C = \mathrm{const};$$

$$\cos\varphi_A = \cos\varphi_B = \cos\varphi_C,$$

где I_A, I_B, I_C — токи первой, второй и третьей фаз; U_A, U_B, U_C — фазные напряжения.

Фазные напряжения сдвинуты относительно друг друга во времени на 1/3 периода. Соответственно на 1/3 периода сдвинуты относительно друг друга токи фаз.

Фазовый угол сдвига φ между током и напряжением фазы зависит от нагрузки. С увеличением последней он уменьшается, а коэффициент мощности $\cos\varphi$ возрастает.

При включении двигателя в сеть однофазного тока в качестве конденсаторного симметрия токов и напряжений статорных обмоток нарушается. Мощность двигателя при этом недоиспользуется, а зависимости токов и напряжений от нагрузки приобретают различный характер.

Условимся считать, что при включении конденсаторного двигателя по любой из рассмотренных схем напряжение сети U и рабочая емкость $C_р$ остаются постоянными, причем $C_р = C_{р,ном}$. Токи, напряжения и скольжение выразим в относительных единицах, т. е. в долях номинальных величин.

Зависимости токов от скольжения конденсаторного двигателя, статорные обмотки которого соединены звездой (рис. 15, *а*), иллюстрируются кривыми на рис. 15, *б*.

Ток фазы *А* с увеличением нагрузки возрастает, фазы *С* уменьшается, а фазы *В* изменяется неоднозначно, т. е.

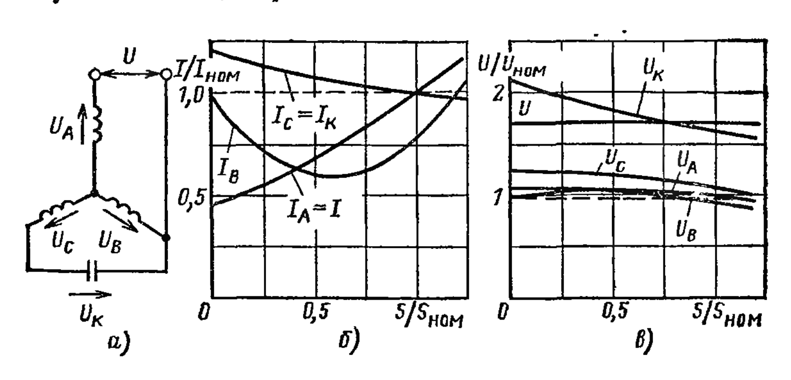


Рис. 15. Соединение статорных обмоток конденсаторного двигателя звездой:

а — принципиальная схема; *б* — графики зависимости токов; *в* — графики зависимости напряжений от скольжения при $C_р = C_{р\ ном}$

сначала уменьшается, затем, достигнув минимального значения, начинает возрастать. Заметим, что и для других схем включения конденсаторного двигателя с тремя обмотками на статоре характерна следующая особенность: фаза, ток которой с изменением нагрузки изменяется неоднозначно, при холостом ходе переходит в генераторный режим.

Напряжение на конденсаторе, уменьшающееся с нагрузкой, соизмеримо с напряжением сети (рис. 15, *в*). Фазные напряжения неодинаковы.

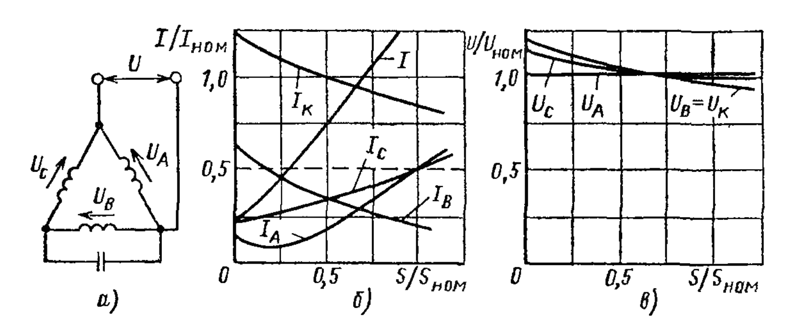


Рис. 16. Соединение статорных обмоток конденсаторного двигателя треугольником·

а — принципиальная схема; *б* — графики зависимости токов; *в* — графики зависимости напряжений от скольжения при $C_р=C_{р,ном}$

При соединении обмоток двигателя в треугольник (рис. 16, *а*) зависимости токов от скольжения аналогичны кривым рис. 15, *б*. Неоднозначное изменение тока относится в данном случае к фазе *А*.

Ток конденсатора $I_к$ существенно превышает номинальный ток фазы, так как для схемы на рис. 16, *а* характерна значительная емкость $C_{р,ном}$ [см. (13)]. Фазные напряжения U_B и U_C в режиме номинальной нагрузки практически равны напряжению первой фазы U_A (рис. 16, *в*).

Графики токов двигателя с конденсатором, включенным в цепь двух статорных обмоток (рис. 17, *а*), приведены на рис. 17, *б*. Ток конденсаторной фазы с увеличением скольжения уменьшается, главной фазы — изменяется неоднозначно.

Напряжение на конденсаторе (рис. 17, *в*) значительно превышает напряжение сети, с чем необходимо счи-

таться на практике. Напряжения статорных обмоток исходного трехфазного двигателя в режиме номинальной нагрузки несущественно отличаются по значению.

При включении двигателя по схеме рис. 18, *а* зависимости токов от скольжения (рис. 18, *б*) аналогичны графикам на рис. 17, *б*. Напряжение на конденсаторе не-

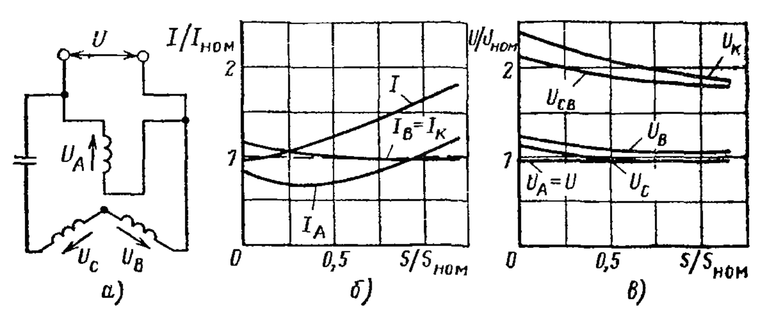


Рис. 17. Соединение двух статорных обмоток последовательно с конденсатором конденсаторного двигателя:

а — принципиальная схема; *б* — графики зависимости токов; *в* — графики зависимости напряжений от скольжения при $C_р = C_{р,ном}$

сколько выше напряжения сети (рис. 18, *в*). Статорные обмотки исходного трехфазного двигателя находятся под напряжением, близким к номинальному. Ток конденсаторной фазы независимо от схемы включения двигателя имеет один и тот же характер — он уменьшается с увеличением нагрузки. Поясним сказанное.

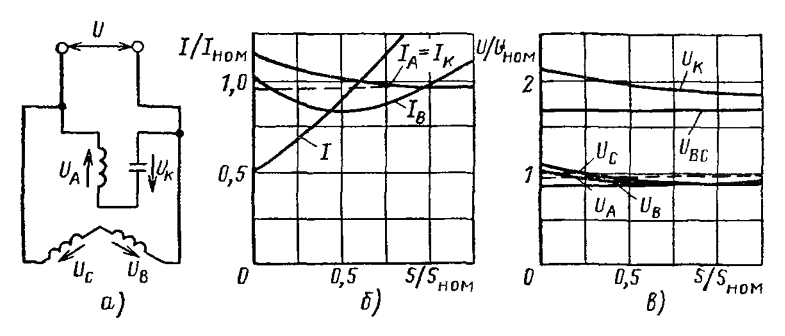


Рис. 18. Соединение одной статорной обмотки последовательно с конденсатором конденсаторного двигателя:

а — принципиальная схема; *б* — графики зависимости токов; *в* — графики зависимости напряжений от скольжения при $C_р = C_{р,ном}$

Конденсаторная фаза (например фаза A, рис. 18, a) может быть представлена в виде электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных активного r, индуктивного x_L и емкостного x_C сопротивлений. Реактивные сопротивления фазы связаны неравенством

$$x_C > x_L,$$

отвечающим необходимому сдвигу во времени (приблизительно на четверть периода) токов главной и конденсаторной фаз.

Построим по правилам, изложенным выше (см. § 9), прямоугольный треугольник напряжений для цепи конденсаторной фазы с учетом приведенного неравенства реактивных сопротивлений. Катетами его будут $\underline{I}_A r$ и $\underline{I}_A (x_C - x_L)$, а гипотенузой $\underline{I}_A Z$. Очевидно, что, разделив эти падения напряжений на ток фазы $\underline{I}_A$, получим треугольник сопротивлений, подобный исходному, причем полное сопротивление цепи конденсаторной фазы равно

$$Z = \sqrt{r^2 + (x_C - x_L)^2},$$

$$\text{где } x_C = \frac{1}{\omega C_р} = \text{const} \; (C_р = \text{const}).$$

Сопротивления r и x_L зависят от режима работы (скольжения), т. е. являются переменными. Определяющее влияние на характер изменения сопротивления Z оказывает индуктивное сопротивление x_L. Последнее с увеличением нагрузки уменьшается. В результате полное сопротивление цепи конденсаторной фазы возрастает, а ток фазы при условии $U = \text{const}$ — уменьшается.

11. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Векторные диаграммы являются наглядным и вместе с тем достаточно точным средством исследования режимов работы машин переменного тока. Они могут быть построены для первичной (статорной) и вторичной (роторной) цепей. Применительно к конденсаторному двигателю ограничимся рассмотрением векторных диаграмм токов и напряжений статорных цепей.

Исходными данными для построения векторных диаграмм являются токи, напряжения и активные мощности

обмоток, а также ток и напряжение сети. Все эти величины могут быть получены экспериментально.

Методика построения векторных диаграмм состоит в следующем: для рассматриваемой схемы включения двигателя составляется система уравнений токов и напряжений; один из векторов, входящих в систему уравнений, принимается за исходный и в определенном, удобном для построения масштабе изображается на чертеже; после исходного вектора вычерчиваются остальные.

Масштабы токов и напряжений выбираются независимо относительно друг друга.

Для данного режима работы относительная ориентация векторов на диаграмме остается неизменной. Однако положение каждого из них определяется (задается) положением исходного вектора. Условимся в качестве последнего принимать вектор напряжения сети, полагая, что в рассматриваемый момент времени его направление совпадает с положительным направлением оси абсцисс.

Как графические построения векторные диаграммы иллюстрируют связи между напряжениями или токами, вытекающие из законов Кирхгофа.

Для соединения статорных обмоток двигателя в звезду (рис. 15, *а*) получим:

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B = \underline{U}; \tag{24а}$$

$$\underline{U}_B - \underline{U}_C = \underline{U}_к; \tag{24б}$$

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B + \underline{I}_C, \tag{24в}$$

причем

$$\underline{I}_A = \underline{I}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_к,$$

где $\underline{I}$ — ток двигателя; $\underline{I}_к$ — ток конденсатора.

Отложив вектор напряжения сети в положительном направлении оси абсцисс, определяем в соответствии с уравнением (24а) положение векторов фазных напряжений $\underline{U}_A$ и $\underline{U}_B$ с помощью циркуля методом засечек. Дуги окружностей с радиусом, пропорциональным фазным напряжениям U_A и U_B, проведенные из начала и конца вектора напряжения сети $\underline{U}$, пересекаются в двух точках. Тем не менее истинное решение является единственным. Правильность его подтверждается последующим построением. Примем, что векторы напряжений уравнения (24а) имеют последовательность $\underline{U}_A$—$\underline{U}$—$\underline{U}_B$ (при

вращении векторов против часовой стрелки), показанную на рис. 19.

Напряжение фазы B согласно (24) определяется геометрической суммой напряжений фазы C и конденсатора. Проделав аналогичный прием, находим положение векторов $\underline{U}_C$ и $\underline{U}_к$. После этого нетрудно построить векторную диаграмму токов. Предварительно расчетом определяются коэффициенты мощности по формулам

$$\left.\begin{aligned} \cos\varphi_A &= \frac{P_A}{U_A I_A}; \\ \cos\varphi_B &= \frac{P_B}{U_B I_B}; \\ \cos\varphi_C &= \frac{P_C}{U_C I_C}; \\ \cos\varphi &= \frac{P_1}{UI} \end{aligned}\right\} \qquad (25)$$

и фазовые углы сдвига φ_A, φ_B, φ_C и φ.

Сопротивления обмоток двигателя имеют активно-индуктивный характер, поэтому токи обмоток отстают от приложенных к ним напряжений на соответствующие фазовые углы сдвига.

Построив таким образом векторы токов, следует убе-

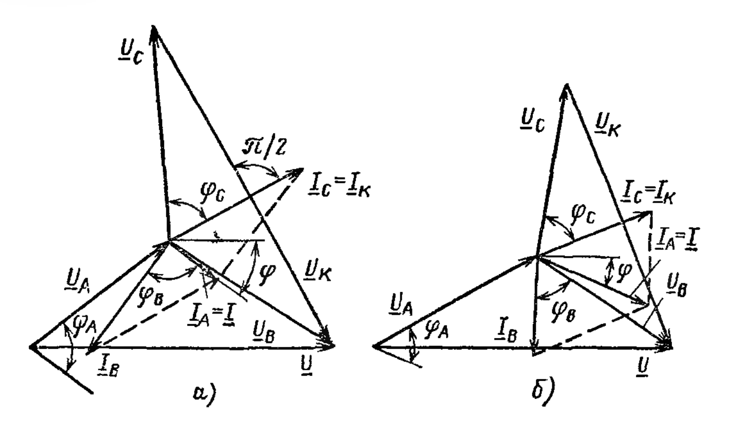


Рис. 19 Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме рис. 15, *а*:

а — при холостом ходе; *б* — при номинальной нагрузке

диться в том, что выполняется условие, выражаемое уравнением (24в), причем ток фазы C, равный току конденсатора, опережает напряжение конденсатора на угол, равный $\pi/2$.

Векторные диаграммы токов и напряжений статорных цепей двигателя при холостом ходе и номинальной нагрузке, построенные по (24) и (25), показаны на рис. 19, *а* и *б*.

В режиме холостого хода (рис. 19, *а*) активные мощности первой и третьей фаз положительны ($P_A>0$; $P_C>0$). Действительно, фазовые углы сдвига $\varphi_A<\pi/2$, $\varphi_C<\pi/2$, активные составляющие токов обмоток $I_A \cos\varphi_A$, $I_C \cos\varphi_C$ совпадают по фазе соответственно с напряжениями $\underline{U}_A$ и $\underline{U}_C$. Следовательно, мощности P_A и P_C **потребляются**, т. е. поступают из сети (см. § 9).

Активная мощность второй фазы отрицательна ($P_B<0$), активная составляющая тока $I_B \cos\varphi_B$ сдвинута относительно напряжения $\underline{U}_B$ на 180°, т. е. находится с ним в противофазе. Это означает, что фаза B **генерирует** активную мощность, т. е. возвращает ее в сеть. Выше было показано, что ток фазы B с нагрузкой изменяется неоднозначно. Так же неоднозначно изменяется и мощность этой фазы P_B.

Появление нагрузки приводит к изменению не только тока I_B (рис. 15, *б*), но и его фазы. Вектор тока $\underline{I}_B$ смещается в направлении против часовой стрелки. При $\varphi_B=\pi/2$ мощность

$$P_B = U_B I_B \cos\varphi_B$$

проходит через нулевое значение и затем, изменив свой знак, начинает возрастать.

В режиме номинальной нагрузки (рис. 19, *б*) несимметрия токов и напряжений уменьшается, коэффициент мощности двигателя возрастает, приближаясь к единице (из диаграммы $\cos\varphi\approx 0{,}92$), активные мощности всех статорных обмоток положительны, т. е., в соответствии с изложенным выше, преобразуются в полезную мощность на валу и в мощность, компенсирующую потери внутри машины.

По векторным диаграммам можно проследить не только за изменением токов и напряжений при переходе двигателя из режима холостого хода к номинальной на-

грузке, но и за изменением активных и реактивных мощностей фаз.

Сопоставляя диаграммы рис. 19, можно прийти к выводам, справедливым и для других схем конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками, приведенных на рис. 16—18:

1) статорная обмотка исходного трехфазного двигателя, ток которой с изменением нагрузки от 0 до номинальной изменяется неоднозначно, имеет неоднозначный характер изменения активной мощности и при холостом ходе находится в генераторном режиме;

2) токи фаз I_A, I_B, I_C отстают от фазных напряжений U_A, U_B, U_C соответственно на углы φ_A, φ_B, φ_C. Это означает, что конденсаторный двигатель, так же как и двигатель, работающий от сети трехфазного тока, всегда находится в режиме потребления реактивный мощности. Источником последней являются конденсаторы и сеть.

Уравнения напряжений и токов двигателя при соединении статорных обмоток в треугольник (рис. 16, *а*) принимают вид

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_A &= \underline{U}_B + \underline{U}_C; \\ \underline{I}_A + \underline{I}_C &= \underline{I}; \\ \underline{I}_B + \underline{I}_\text{к} &= \underline{I}_C, \end{aligned}\right\} \qquad (26)$$

причем

$$\underline{U}_A = \underline{U}.$$

Векторные диаграммы токов и напряжений двигателя показаны на рис. 20.

Ток конденсатора опережает напряжение U_B по фазе на угол $\varphi_\text{к} = \pi/2$.

Активные мощности второй и третьей фаз при холостом ходе положительны (рис. 20, *а*), т. е. $P_B > 0$, $P_C > 0$.

Мощность первой фазы отрицательна ($P_A < 0$), что указывает на неоднозначный характер ее изменения с изменением нагрузки.

При номинальном режиме (рис. 20, *б*) мощности всех фаз положительны. Коэффициент мощности практически равен единице (из диаграммы $\cos\varphi \approx 0{,}98$).

Уравнения напряжений и токов двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 17, *а*, представим в виде

$$\left.\begin{aligned} \underline{U}_C - \underline{U}_B &= \underline{U}_{CB}; \\ \underline{U}_{CB} + \underline{U}_\text{к} &= \underline{U}_A; \\ \underline{I}_A + \underline{I}_C &= \underline{I}; \\ \underline{I}_B &= -\underline{I}_C, \end{aligned}\right\} \quad (27)$$

причем



$$\underline{U}_A = \underline{U}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_\text{к}.$$

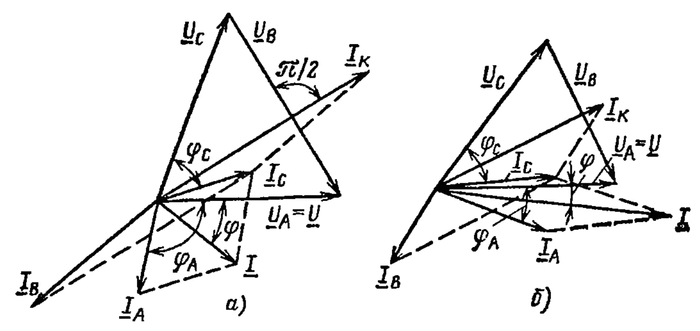


Рис. 20. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме рис. 16, *а*:

а — при холостом ходе; *б* — при номинальной нагрузке

Соответствующие им векторные диаграммы показаны на рис. 21. Ток I_C опережает напряжение конденсатора $U_\text{к}$ по фазе на угол $\varphi_\text{к} = \pi/2$.

Из диаграммы для холостого хода (рис. 21, *а*) находим:

$$P_A < 0\,(\varphi_A > \pi/2); \quad P_B > 0\,(\varphi_B < \pi/2);$$
$$P_C \approx 0\,(\varphi_C \approx \pi/2),$$

т. е. первая фаза двигателя находится в генераторном режиме, а вторая—в двигательном. Активная мощность P_C третьей фазы близка к нулю.

При номинальной нагрузке (рис. 21, *б*) токи фаз равны номинальному току, коэффициент мощности двигателя близок к единице (из диаграммы $\cos\varphi \approx 0{,}96$).

Активные мощности обмоток $P_A > 0$, $P_B > 0$, $P_C \approx 0$.

В двигательном режиме находятся только две статорные обмотки.

Из сопоставления диаграмм рис. 21 следует, что одна

из статорных обмоток двигателя, включенного по схеме приведенной на рис. 17, *а*, с возрастанием нагрузки от 0 до номинальной активную мощность не развивает. Поэтому использование мощности двигателя ухудшается. Заметим, что если путем переключения фазы *А* (рис. 17, *а*) изменить направление вращения двигателя, то изменится порядок следования фаз и статорные обмотки фаз *В* и *С* поменяются ролями.

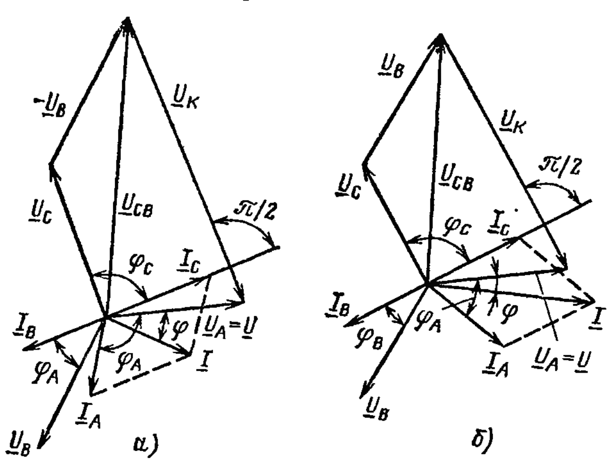


Рис. 21. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме рис. 17, *а*:

а — при холостом ходе; *б* — при номинальной нагрузке

Уравнения напряжений и токов двигателя, включенного по схеме рис. 18, *а*, можно записать в виде

$$\underline{U}_B - \underline{U}_C = \underline{U}_{BC}; \tag{28а}$$

$$\underline{U}_A + \underline{U}_к = \underline{U}; \tag{28б}$$

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B = \underline{I}; \tag{28в}$$

$$\underline{I}_B = -\underline{I}_C, \tag{28г}$$

причем

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}; \quad \underline{I}_A = \underline{I}_к.$$

Соответствующие им векторные диаграммы представлены на рис. 22. Ток фазы *А* опережает напряжение конденсатора $U_к$ по фазе на угол $\varphi_к = \pi/2$.

При холостом ходе (рис. 22, *а*) первые две фазы двигателя потребляют активную мощность, а третья ее генерирует:

$$P_A > 0\,(\varphi_A < \pi/2);\quad P_B > 0\,(\varphi_B < \pi/2);$$
$$P_C < 0\,(\varphi_C > \pi/2).$$

В режиме номинальной нагрузки (рис. 22, *б*) токи фаз равны номинальному току. Мощности всех статорных обмоток положительны, коэффициент мощности двигателя близок к единице (из диаграммы $\cos\varphi \approx 0{,}96$).

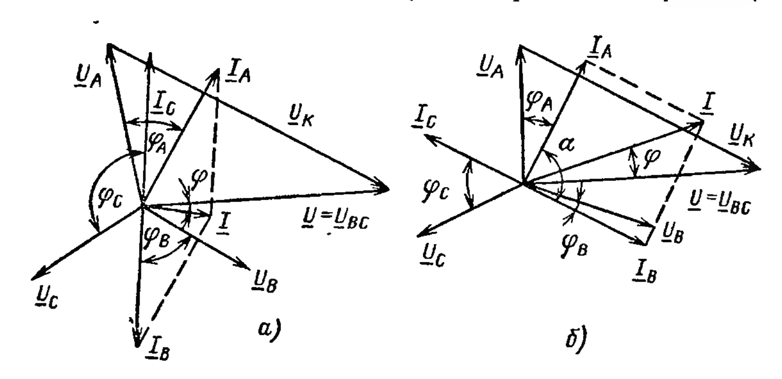


Рис. 22. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя, включенного по схеме рис 18, *а*:

а — при холостом ходе; *б* — при номинальной нагрузке

Токи главной и конденсаторной фаз сдвинуты на угол $\alpha \approx \pi/2$, вследствие этого вращающееся магнитное поле машины становится практически круговым. Из рассмотрения диаграммы непосредственно следует, что для конденсаторного двигателя, включенного по схеме рис. 18, *а*, характерно улучшенное использование его мощности. Как было отмечено выше, эта схема является наиболее рациональной.

12. РАСЧЕТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧЕЙ ЕМКОСТИ

Рассмотрим расчетное определение рабочей емкости применительно к схеме включения конденсаторного двигателя, показанной на рис. 18, *а*, полагая, что в воздушном зазоре машины создается круговое вращающееся магнитное поле. При этом МДС главной и конденсатор-

ной фаз, сдвинутые относительно друг друга в пространстве на 90° и во времени на 1/4 периода, равны (см. рис. 8, *в*):

$$I_{г,ф} w_{г,ф} = I_{к,ф} w_{к,ф},$$

где $w_{г,ф}$ — число витков главной фазы; $w_{к,ф}$ — число витков конденсаторной фазы, равное числу витков статорной обмотки исходного трехфазного двигателя. Из схемы, приведенной на рис. 18, *а*, следует очевидное равенство $w_{к,ф} = w_A$.

Установим соотношение между числами витков главной и конденсаторной фаз. Обратимся к рис. 8, *в*, из которого видно, что намагничивающее действие тока $I_{г,ф}$, проходящего по двум статорным обмоткам двигателя, соединенным последовательно, эквивалентно намагничивающему действию одной обмотки (главной фазы) с числом витков $w_{г,ф}$, по которой проходит тот же ток, причем ось главной фазы сдвинута в пространстве относительно оси конденсаторной фазы на 90°.

Если принять, что ток главной фазы $I_{г,ф} = 1$ отн. ед., то отрезки *02, 03* и *04* будут пропорциональны числам витков соответствующих обмоток.

Следовательно,

$$w_{г,ф} = w_B \cos 30° + w_C \cos 30° = \sqrt{3}\, w_{к,ф},$$

где $w_B = w_C = w_A = w_{к,ф}$.

Из условия равенства МДС, приведенного выше, находим зависимость между токами обмоток:

$$I_{г,ф} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{к,ф}.$$

Примем, что напряжения и токи двигателя образуют симметричные двухфазные системы. Тогда треугольник напряжений статорных цепей в отличие от треугольников напряжений, изображенных на рис. 22, становится прямоугольным с углом $(\widehat{U_к, U}) = 30°$. Из него получаем:

$$U_к = \frac{U_{г,ф}}{\cos 30°} = \frac{2}{\sqrt{3}} U_{г,ф} = \frac{2}{\sqrt{3}} U;$$

$$U_{к,ф} = U_к \sin 30° = \frac{1}{\sqrt{3}} U_{г,ф} = \frac{1}{\sqrt{3}} U.$$

Полные мощности главной и конденсаторной фаз равны:

$$U_{г,ф} I_{г,ф} = U_{к,ф} I_{к,ф},$$

в чем легко убедиться по приведенным выше уравнениям связи между токами и напряжениями фаз.

Из последнего выражения вытекает, что полная мощность, потребляемая двигателем из сети, может быть представлена в виде соотношения

$$S = 2U_{г,ф} I_{г,ф} = 2UI_{г,ф}.$$

Реактивная мощность конденсаторов при круговом вращающемся поле равна полной мощности двигателя:

$$Q_к = U_к I_{к,ф} = \frac{2}{\sqrt{3}} U \sqrt{3} I_{г,ф} = 2UI_{г,ф}.$$

С другой стороны,

$$Q_к = I^2_{к,ф} x_C = \frac{I^2_{к,ф}}{\omega C}.$$

Приравнивая правые части последних выражений и учитывая зависимость между токами главной и конденсаторной фаз, находим емкость конденсаторов при круговом вращающемся поле в фарадах

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{к,ф}}{\omega U},$$

или в микрофарадах

$$C = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{к,ф} \cdot 10^6}{\omega U}. \qquad (29)$$

Из полученных соотношений следует, что при номинальном токе главной фазы $I_{г,ф} = I_{ном}$ по условию образования кругового вращающегося поля в цепь конденсаторной фазы следует ввести емкость, соответствующую току $I_{к,ф} = \sqrt{3}\, I_{ном}$. Проводники обмоток статора исходного трехфазного двигателя имеют одинаковую площадь поперечного сечения, поэтому нельзя допустить, чтобы при номинальном токе главной фазы ток конденсаторной фазы составлял 1,73 номинального значения.

Однако нет необходимости добиваться идеальной симметрии токов и напряжений, тем более, что она соответствует только одной определенной нагрузке. Вполне

достаточно иметь условия, возможно более близкие к симметричному режиму, когда обратное поле не оказывает заметного влияния на работу двигателя (см. диаграмму на рис. 22, *б*).

Номинальной нагрузкой конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками следует признать такую нагрузку, при которой токи в обмотках практически равны номинальному току фазы, обозначенному на щитке.

Таким образом, рабочая емкость конденсаторов может определяться по выражению (29), в котором значение тока конденсаторной фазы принимается равным номинальному:

$$C_{р,ном} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{I_{ном}}{\omega U} 10^6. \tag{30}$$

Применительно к частоте 50 Гц эта формула после подстановки $\omega = 314$ $^1/_с$ и сокращений приводится к (15).

Рабочая емкость $C_{р,ном}$ в соответствии с (30) при условиях $U = \text{const}$, $\omega = \text{const}$ пропорциональна номинальному току фазы.

Для номинального тока, выраженного через полную мощность двигателя и фазное значение напряжения, имеем:

$$I_{ном} = \frac{S_{ном}}{3U_{ном}}. \tag{31}$$

Последнее выражение с учетом (8) получает вид

$$I_{ном} = \frac{P_{1ном}}{3U_{ном} \cos \varphi_{ном}}. \tag{32}$$

Активная мощность $P_{1ном}$, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке, может вычисляться по (7).

Соотношение (32) характеризует влияние коэффициента мощности на ток. Для одних и тех же значений полезной мощности и КПД ток двигателя тем меньше, чем выше коэффициент мощности. Объясняется это ограничением удельной намагничивающей мощности (см. рис. 3 и 4), обусловливающим в соответствии с (4) и (31) уменьшение полной мощности и тока.

Отсюда становится очевидной зависимость емкости, необходимой для образования в воздушном зазоре машины кругового или практически кругового поля, от коэффициента мощности исходного трехфазного двигателя. Чем выше коэффициент мощности, тем меньше

реактивная мощность, ток двигателя, а также рабочая емкость $C_{р,ном}$.

Пример. Определим рабочую емкость $C_{р,ном}$ двигателей мощностью 1,1; 1,5 и 2,2 кВт (табл 1), включенных по схеме рис. 9, *г* на напряжение сети 380 В.

Номинальный ток двигателя мощностью 1,1 кВт равен:

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{3U_{ном} \cos \varphi_{ном} \eta_{ном}} = \frac{1,1 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,73 \cdot 0,76} = 3 \text{ А}.$$

Емкость $C_{р,ном}$ определяем по (15):

$$C_{р\,ном} \approx 2740 \frac{I_{ном}}{U} = 2740 \frac{3}{380} \approx 22 \text{ мкФ}.$$

Аналогичным образом производятся расчеты для остальных двигателей

Построенные по данным расчетов кривые (рис. 23) иллюстрируют зависимость рабочей емкости $C_{р,ном}$ от

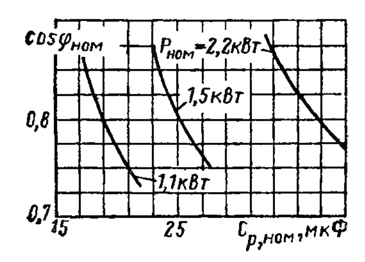


Рис. 23. Зависимости рабочей емкости от коэффициента мощности асинхронного двигателя $C_{р,ном} = f(\cos \varphi_{ном})$ при $P_{ном} = \text{const}$

коэффициента мощности $\cos \varphi_{ном}$ при одном и том же значении номинальной мощности асинхронного двигателя $P_{ном} = \text{const}$.

13. КОНДЕНСАТОРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ КАК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧИСЛА ФАЗ

В воздушном зазоре конденсаторного двигателя создается вращающееся магнитное поле, которое может стать круговым. Для этого достаточно, чтобы намагничивающие силы двух обмоток, образованных из трех фаз исходного трехфазного двигателя (см. рис. 9, *в, г*), были численно равны, а токи обмоток сдвинуты во времени на $^1/_4$ периода. Однако равенство намагничивающих сил обмоток достигается лишь в частном случае, т. е. соответствует одной определенной нагрузке. С другой стороны, при вращении ротора обратное поле су-

щественно ослабляется, особенно если нагрузка на валу двигателя равна номинальной или близка к ней. Предполагается также, что рабочая емкость подобрана правильно.

Изложенное позволяет пренебречь влиянием обратного поля на работу двигателя и принять близкое к действительности допущение, что вращающееся магнитное поле машины является круговым. Силовые линии этого поля, пересекая проводники статорных обмоток, индуктируют в них переменные электродвижущие силы.

Из сказанного следует возможность использования конденсаторного двигателя с тремя статорными обмотками для преобразования числа фаз, т. е. в режиме преобразователя однофазного напряжения питающей сети в трехфазное.

Такой преобразователь может найти широкое применение в условиях сельскохозяйственного производства, когда трехфазная сеть отсутствует и в то же время возникает необходимость в источниках питания трехфазных двигателей небольшой мощности (ручной электроинструмент, машинки для электрострижки овец и др.).

Одна из возможных схем конденсаторного двигателя — преобразователя числа фаз, предназначенного для электроснабжения потребителей трехфазного тока, приведена на рис. 24. Статорные обмотки двигателя и сопротивления фаз нагрузки имеют схему соединения звездой.

Для конденсаторного двигателя — преобразователя фаз — возможны следующие режимы:

1) двигателя (нагрузка приложена со стороны вала, рубильник S разомкнут);

2) преобразователя фаз (нагрузка на валу отсутствует, рубильник S замкнут);

3) двигателя — преобразователя фаз (нагрузка приложена со стороны вала, рубильник S замкнут).

Очевидно, что в любом из отмеченных режимов ток наиболее нагруженной фазы не должен превышать номинального.

Будем полагать, что рубильник S замкнут и что двигатель используется в качестве преобразователя фаз.

Напряжения статорных обмоток образуют несимметричную трехфазную систему (рис. 25, *а*), в которой по сравнению с симметричной сохраняется только порядок следования фаз, отмеченный стрелкой; численные значе-

ния напряжений неодинаковы; углы сдвига фаз между векторами $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ существенно отличаются от 120°. Положение этих векторов, показанных исходящими из одной точки, устанавливается по векторной диаграмме двигателя (см. рис. 19, *а*).

Геометрическая сумма напряжений первых двух фаз дает линейное напряжение $\underline{U}_{AB}$, равное напряжению сети:

$$\underline{U}_A + \underline{U}_B = \underline{U}_{AB} = \underline{U}.$$

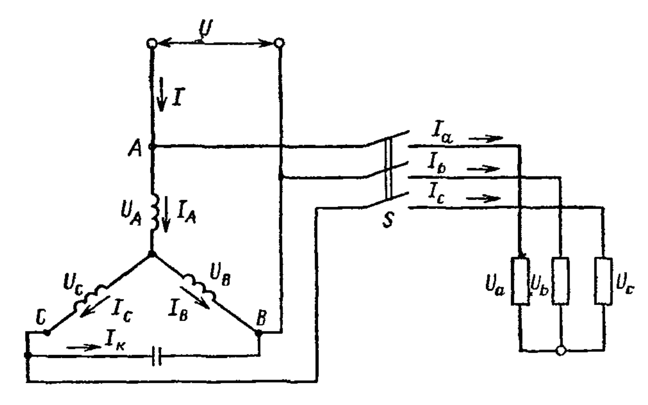


Рис 24. Схема асинхронного конденсаторного двигателя — преобразователя фаз:

U — напряжение питающей сети; U_A, U_B, U_C — напряжения статорных обмоток двигателя; I_A, I_B, I_C — токи статорных обмоток; $I_к$ — ток конденсатора; U_a, U_b, U_c — напряжения фаз нагрузки; I_a, I_b, I_c — токи фаз нагрузки

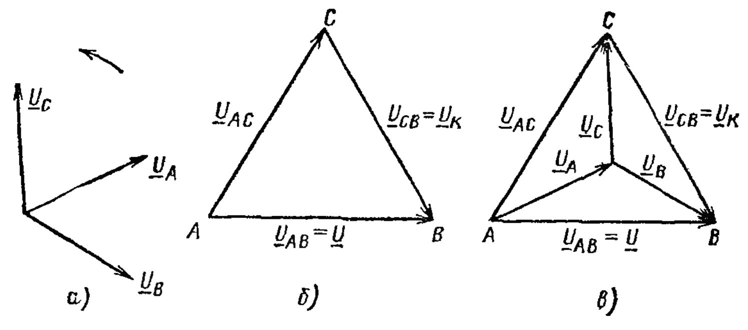


Рис. 25. Векторные диаграммы напряжений конденсаторного двигателя:

а — фазные напряжения; *б* — линейные напряжения; *в* — фазные и линейные напряжения

С другой стороны (см. рис. 24), геометрическая сумма двух других линейных напряжений также равна напряжению сети:

$$\underline{U}_{AC} + \underline{U}_{CB} = \underline{U}.$$

Таким образом, векторы линейных напряжений образуют замкнутый треугольник (рис. 25, *б*). Построив внутри него векторы фазных напряжений, получим векторную диаграмму напряжений конденсаторного двигателя (рис. 25, *в*) с соединением обмоток статора звездой.

Векторная диаграмма напряжений в цепи приемников трехфазного тока приведена на рис. 26. Установим соотношения для фазных напряжений U_a, U_b, U_c нагрузки.

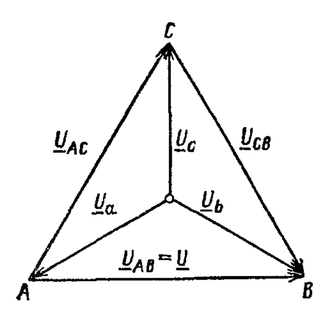


Рис. 26. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений симметричной нагрузки

Сумма токов линейных проводов равна нулю:

$$\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 0, \qquad (33)$$

или, если представить токи в виде произведения напряжений на соответствующие проводимости,

$$\underline{U}_a \underline{Y}_a + \underline{U}_b \underline{Y}_b + \underline{U}_c \underline{Y}_c = 0, \qquad (34)$$

где $\underline{Y}_a$, $\underline{Y}_b$, $\underline{Y}_c$ — комплексные проводимости фаз нагрузки.

С комплексными величинами по существу мы уже встречались при построении векторных диаграмм (см. § 11). Положение вектора на плоскости (называемой комплексной) определяется его проекциями на взаимно перпендикулярные оси — $0x$ и $0y$. Условимся первую называть осью вещественных, вторую — осью мнимых чисел. В комплексном выражении

$$\underline{A} = a_1 + ja_2,$$

где $\underline{A}$ — вектор (комплексное число); a_1 — его проекция на ось $0x$; a_2 — проекция вектора на ось $0y$; j — комплексный множитель (мнимая единица), причем

$$j = \sqrt{-1}, \quad j \cdot j = j^2 = -1.$$

Очевидно, что численное значение комплексного числа (его модуль) выражается на комплексной плоскости гипотенузой прямоугольного треугольника, катеты которого равны проекциям на оси $0x$ и $0y$. В данном случае модуль a комплексного числа $\underline{A}$ равен:

$$a = \sqrt{a_1^2 + a_2^2}.$$

Комплексное число, отличающееся от данного только знаком перед мнимой частью, называется сопряженным.

Пример. Написать выражение для комплексного числа (комплекса) $\underline{B}$, сопряженного с комплексом $\underline{A}$.

По определению имеем:

$$\underline{B} = a_1 - ja_2.$$

Заметим, что в частном случае одно из слагаемых правой части равенства комплексного выражения может отсутствовать. Это указывает на расположение вектора по одной из осей координат ($0x$ или $0y$).

Пример. Выражения дли комплексов тока и напряжения имеют вид $\underline{I} = j20$, $\underline{U} = 220$ В. Определить положение векторов на комплексной плоскости и найти их числовые значения.

В данном случае вектор тока совпадает с осью $0y$ (проекция на ось вещественных чисел равна нулю), а вектор напряжения — с осью $0x$. Числовые значения: $I = 20$ А, $U = 220$ В.

Рассмотрим некоторые действия над комплексными числами.

При сложении комплексных чисел суммируются отдельно их вещественные и мнимые части.

Пример. Найти сумму двух комплексных чисел: $\underline{D} = 12 + j10$ и $\underline{F} = 8 - j25$.

Ответ: $\underline{D} + \underline{F} = (12+8) + j(10-25) = 20 - j15$.

Умножение комплексных чисел производят по обычной методике.

Пример. Найти произведение комплексов $\underline{G} = 3 + j5$ и $\underline{H} = 3 - j5$.

Находим: $\underline{G}\underline{H}=(3+j5)(3-j5)=9+j15-j15+25=34$, т. е. произведение сопряженных величин дает вещественное число.

Для получения частного от деления двух комплексных чисел необходимо избавиться от мнимой части в знаменателе.

Пример. Найти комплексную проводимость фазы, если комплексное сопротивление последней равно: $\underline{Z}=7{,}5+j22{,}3$.

Комплексная проводимость обратна комплексиому сопротивлению, поэтому

$$\underline{Y}=\frac{1}{\underline{Z}}=\frac{1}{7{,}5+j22{,}3}\cdot\frac{7{,}5-j22{,}3}{7{,}5-j22{,}3}$$

или

$$\underline{Y}=\frac{7{,}5-j22{,}3}{7{,}5^2+22{,}3^2}=0{,}0136-j0{,}04.$$

Модуль комплексной проводимости равен:

$$y=\sqrt{0{,}0136^2+0{,}04^2}=0{,}042 \text{ См}.$$

Вернемся теперь к соотношению (34) и разрешим его относительно напряжения первой фазы нагрузки $\underline{U}_a$.

Из рассмотрения векторной диаграммы рис. 26 следует:

$$\left.\begin{aligned}\underline{U}_b&=\underline{U}_a+\underline{U}_{AB};\\ \underline{U}_c&=\underline{U}_a+\underline{U}_{AC}.\end{aligned}\right\}\qquad(35)$$

После подстановки в (34) значений фазных напряжений $\underline{U}_b$ и $\underline{U}_c$ из (35) и преобразований получим:

$$\underline{U}_a=\frac{\underline{U}_{AB}\underline{Y}_b+\underline{U}_{AC}\underline{Y}_c}{\underline{Y}_a+\underline{Y}_b+\underline{Y}_c}.\qquad(36)$$

Аналогичным образом при определении напряжения второй фазы используются соотношения

$$\left.\begin{aligned}\underline{U}_a&=\underline{U}_b-\underline{U}_{AB}\\ \underline{U}_c&=\underline{U}_b-\underline{U}_{CB},\end{aligned}\right\}\qquad(37)$$

которые нетрудно установить по векторной диаграмме рис. 26, и, соответственно, при определении напряжения третьей фазы:

$$\left.\begin{aligned}\underline{U}_a&=\underline{U}_c-\underline{U}_{AC};\\ \underline{U}_b&=\underline{U}_c+\underline{U}_{CB}.\end{aligned}\right\}\qquad(38)$$

В результате совместного решения уравнений (34) и (37) и затем (34) и (38) находим выражения для напряжений второй и третьей фаз нагрузки:

$$\underline{U}_b = \frac{\underline{U}_{AB}\underline{Y}_a + \underline{U}_{CB}\underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}, \qquad (39)$$

$$\underline{U}_c = \frac{\underline{U}_{AC}\underline{Y}_a - \underline{U}_{CB}\underline{Y}_b}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c}. \qquad (40)$$

Из (36), (39), (40) следует, что для определения фазных напряжений нагрузки должны быть известны комплексы линейных напряжений и комплексные проводимости фаз.

Токи нагрузки находятся по соотношениям

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a \underline{Y}_a;$$

$$\underline{I}_b = \underline{U}_b \underline{Y}_b;$$

$$\underline{I}_c = \underline{U}_c \underline{Y}_c.$$

Как видно из схемы рис. 24,

$$\underline{I}_a = \underline{I} - \underline{I}_A,$$

где $\underline{I}$ — ток, потребляемый двигателем из сети.

Для тока первой фазы имеем:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

Токи системы связаны между собой зависимостями

$$\underline{I}_a = \underline{I} - (\underline{I}_B + \underline{I}_C);$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_B + \underline{I}_к - \underline{I};$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_C - \underline{I}_к.$$

Сумма токов правой части уравнений обращается в нуль, что находится в полном соответствии с (33).

Выше рассмотрен общий случай трехфазной нагрузки, когда комплексные проводимости фаз могли иметь различные произвольные значения — одинаковые или неодинаковые. Однако наиболее характерной нагрузкой конденсаторного двигателя как преобразователя фаз является симметричная нагрузка, для которой

$$\underline{Y}_a = \underline{Y}_b = \underline{Y}_c = \underline{Y}.$$

С учетом этого равенства расчетные соотношения (36), (39), (40) приводятся к виду

$$\underline{U}_a = -\frac{\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{AC}}{3}; \quad (41)$$

$$\underline{U}_b = \frac{\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{CB}}{3}; \quad (42)$$

$$\underline{U}_c = \frac{\underline{U}_{AC} - \underline{U}_{CB}}{3}. \quad (43)$$

Пример. Определить фазные напряжения симметричной нагрузки при соединении фаз звездой, если известны комплексы линейных напряжений: $\underline{U}_{AB}=220$; $\underline{U}_{AC}=110+j190$; $\underline{U}_{CB}=110-j190$.

Расчетными соотношениями для симметричной нагрузки ($Y_a=Y_b=Y_c$) являются (41) — (43). Поэтому

$$\underline{U}_a = -\frac{220+110+j190}{3} = -110-j64;$$

$$\underline{U}_b = \frac{220+110-j190}{3} = 110-j64;$$

$$\underline{U}_c = \frac{110+j190-110+j190}{3} = j127.$$

Численные значения линейных напряжений:

$$\underline{U}_{AB} = 220 \text{ В}; \quad \underline{U}_{AC} = \underline{U}_{CB} = \sqrt{110^2+190^2} = 220 \text{ В}.$$

Численные значения фазных напряжений:

$$\underline{U}_c = 127 \text{ В}; \quad \underline{U}_a = \underline{U}_b = \sqrt{110^2+64^2} = 127 \text{ В}.$$

Из приведенного примера следует, что при численном равенстве линейных напряжений, образующих несимметричную трехфазную систему ($\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{AC}$, $\underline{U}_{CB}$), и симметричной нагрузке трехфазная система фазных напряжений ($\underline{U}_a$, $\underline{U}_b$, $\underline{U}_c$) становится симметричной (рис. 26).

Векторная диаграмма конденсаторного двигателя как преобразователя фаз при симметричной трехфазной нагрузке приведена на рис. 27. В левой ее части показаны векторы фазных и линейных напряжений двигателя. Эта часть диаграммы рассмотрена выше (рис. 25, *в*).

При построении векторной диаграммы токов принято, что нагрузка на выходе преобразователя имеет активный характер, поэтому векторы фазных токов $\underline{I}_a$, $\underline{I}_b$, $\underline{I}_c$ показаны совпадающими по фазе соответственно с напряжениями $\underline{U}_a$, $\underline{U}_b$, $\underline{U}_c$ (рис. 26).

Ток конденсатора $\underline{I}_к$ опережает напряжение $\underline{U}_{CB}=$

$=\underline{U}_к$ на угол $\pi/2$ рад, а геометрическая сумма токов $\underline{I}_к+\underline{I}_c$ дает ток $\underline{I}_C$ третьей фазы двигателя. Фазовый угол сдвига φ_C определяется направлением векоторов $\underline{U}_C$ и $\underline{I}_C$.

Вектор тока $\underline{I}_B$ второй фазы двигателя сдвинут относительно напряжения $\underline{U}_B$ в сторону отставания на угол φ_B. Геометрической суммой векторов $\underline{I}_B$ и $\underline{I}_C$ определяется значение тока первой фазы $\underline{I}_A$ двигателя и фазовый угол сдвига φ_A.

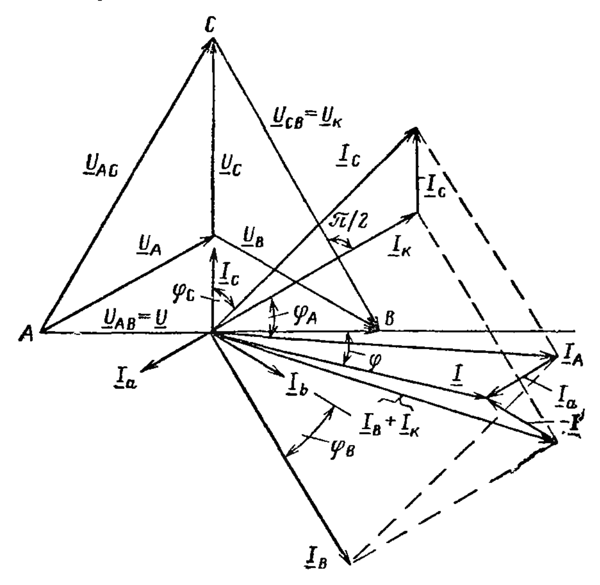


Рис. 27. Векторная диаграмма конденсаторного двигателя — преобразователя фаз при симметричной нагрузке

Сложив геометрически векторы токов $\underline{I}_A$ и $\underline{I}_a$, находят значение и фазу полного тока $\underline{I}$, потребляемого из сети. Заметим, что положение вектора тока $\underline{I}$ на комплексной плоскости может быть определено также с использованием уравнения $\underline{I}=\underline{I}_B+\underline{I}_к-\underline{I}_b$. Коэффициент мощности двигателя в данном случае равен: $\cos\varphi=0{,}95$. Значение полного тока I меньше тока I_A первой фазы, что объясняется наличием в цепи двигателя источника реактивной мощности — конденсатора.

14. РАБОТА КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ УСЛОВИЯХ, ОТЛИЧАЮЩИХСЯ ОТ НОМИНАЛЬНЫХ

Наиболее высокие энергетические показатели при эксплуатации конденсаторного двигателя достигаются при соблюдении следующих условий:

1) частота неизменна и равна номинальной ($f=f_{ном}$);

2) напряжение на выводах машины равно номинальному;

3) токи обмоток не превышают номинальных значений.

Последнее условие применительно к схемам, приведенным на рис. 9, *в, г,* может быть записано в виде

$$I_{г.ф} \approx I_{к.ф} \approx I_{ном}.$$

Выполнение последнего равенства обеспечивается правильным выбором рабочей емкости и соответствующей нагрузкой на валу двигателя.

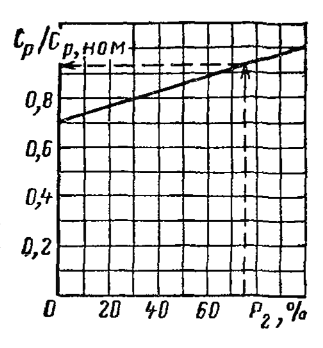
Изменение частоты не является сколько-нибудь существенным даже в энергосистемах местного значения, поэтому им можно пренебречь.

Непостоянство (снижение) напряжения обычно возникает в часы наибольшей нагрузки сети. При этом в значительно большей степени уменьшается вращающий момент, так как для асинхронного двигателя он пропорционален квадрату приложенного напряжения. Так, например, понижение напряжения сети на 30 % вызывает уменьшение момента в 2 раза. В результате такого снижения напряжения двигатель остановится либо будет продолжать вращаться с повышенным скольжением (потребляя большой ток), что может вызвать недопустимый перегрев статорных обмоток, составляющих главную фазу. Отмеченное важное обстоятельство следует иметь в виду, особенно при питании двигателей от электросетей сельских районов с источниками небольшой мощности.

При длительной эксплуатации двигателя с пониженным напряжением необходимо производить соответствующее уменьшение нагрузки.

К нежелательным последствиям с точки зрения нагрева статорных обмоток может привести также несоблюдение третьего условия. Действительно, при всякой нагрузке, превышающей номинальную, перегружается по току

Рис. 28. Зависимость рабочей емкости от нагрузки



главная фаза. То же самое происходит с конденсаторной фазой, только в случае работы с недогрузкой. На холостом ходу ток конденсаторной фазы при выборе рабочей емкости по приведенным выше соотношениям достигает 120—140 % номинального. В последнем случае электрические потери возрастают в 2 раза по сравнению с потерями при номинальном токе.

Сказанное позволяет сделать следующие выводы:

нельзя допускать длительную перегрузку или длительную работу двигателя без нагрузки;

при работе двигателя с недогрузкой рабочую емкость конденсаторов необходимо уменьшать.

Для нагрузки, составляющей например 50 % номинальной, можно принять

$$C_р \approx 0{,}85 C_{р,ном}.$$

Ток конденсаторной фазы при этом не превышает номинального значения.

Воспользовавшись графиком, представленным на рис. 28, легко определить рабочую емкость конденсаторов для любой произвольной нагрузки. С этой целью, выразив полезную мощность P_2 в процентах номинальной мощности $P_{ном}$, находим соответствующее отношение $C_р/C_{р,ном}$, а затем и искомую емкость. Так, например, для $P_2 = 0{,}75\ P_{ном}$ отношение $C_р/C_{р,ном} = 0{,}93$ (см. стрелки на рис. 28). Следовательно,

$$C_р = 0{,}93 C_{р,ном}.$$

Следует отметить, что номинальные данные асинхронных двигателей относятся ко вполне определенным условиям их использования. Наиболее существенными из

этих условий являются: температура окружающей среды; высота над уровнем моря (до 1000 м).

Допустимые значения температуры окружающей среды устанавливаются техническими условиями. В частности, асинхронные двигатели единой серии 4А могут работать с номинальной мощностью, указанной в их паспортных данных, на всем диапазоне изменения температуры от —40 до +40 °С.

Влияние высоты над уровнем моря, бо́льшей 1000 м, проявляется в том, что вследствие разрежения воздуха условия охлаждения ухудшаются.

Из сказанного вытекает, что при эксплуатации двигателей на высоте более 1000 м над уровнем моря или при температуре окружающей среды, превышающей 40 °С, их номинальная мощность должна быть снижена.

15. УЛУЧШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОНДЕНСАТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Конденсаторный двигатель прост по конструкции, имеет высокий коэффициент мощности, работает от двухпроводной и, в частности, от осветительной сети.

Как было отмечено, применение рациональных схем включения создает возможность получения достаточного пускового момента и приводит к улучшению использования мощности машины. Одну из таких схем (см. рис. 9, *г*) будем иметь в виду при дальнейшем изложении.

Несмотря на отмеченные положительные свойства эксплуатация конденсаторного двигателя с рабочей и пусковой емкостями характеризуется рядом определенных недостатков. Основные из них заключаются в следующем:

для создания необходимого пускового момента приходится включать в цепь конденсаторной фазы дополнительную емкость, отключаемую после пуска. При разрыве цепи отключаемой емкости возникающее в месте разрыва искрение уменьшает безопасность эксплуатации двигателя, особенно во взрывоопасных помещениях. Кроме того, резкое уменьшение тока конденсаторной фазы после отключения дополнительной емкости связано с появлением динамических толчков и уменьшением ускорения ротора, что подтверждается осциллограммами (рис. 29):

описанный выше характер изменения тока конденса-

торной фазы с изменением нагрузки приводит к ухудшению использования мощности двигателя и уменьшению его перегрузочной способности;

холостой ход конденсаторного двигателя с постоянной рабочей емкостью $C_{р,ном}$ не только нежелателен, но и опасен, так как ток конденсаторной фазы, достигая в этом случае наибольшего значения, может вызвать недопустимый перегрев обмотки.

Расширение области применения конденсаторного двигателя непосредственно связано с устранением отмеченных недостатков.

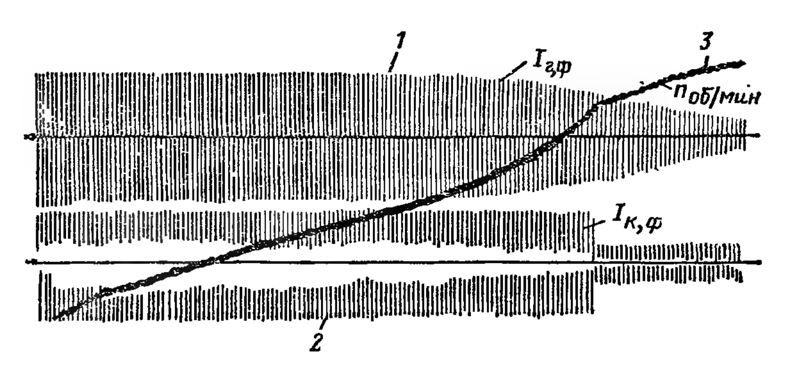


Рис. 29. Осциллограммы, снятые при пуске конденсаторного двигателя с отключаемой емкостью:

1 — ток главной фазы; 2 — ток конденсаторной фазы; 3 — частота вращения

Ограничение тока конденсаторной фазы при XX может быть достигнуто уменьшением емкости конденсаторов. Чтобы далее (с увеличением нагрузки) ток конденсаторной фазы увеличивался, необходимо производить увеличение емкости, т. е. осуществлять ее регулирование. Желательно, чтобы последнее совершалось плавно и автоматически, начиная с момента пуска двигателя.

Автоматическое регулирование эквивалентной емкости в цепи конденсаторной фазы возможно различными способами. Один из них основывается на использовании в схеме дросселя насыщения (ДН).

Развитие автоматизации производственных процессов в промышленности привело к значительному распространению *ДН*, что объясняется известными экономиче-

скими и эксплуатационными достоинствами этих аппаратов.

Рассмотрим схему включеиия конденсаторного двигателя (рис. 30), в которой обмотки переменного тока *ДН* включены на напряжение конденсатора.

Дроссель насыщения имеет две обмотки подмагничивания, включенные встречно. Ток одной из них пропорционален току главной фазы двигателя, ток другой — напряжению на конденсаторной фазе. Первая обмотка имеет небольшое число витков. Действие МДС этой обмотки проявляется тем сильнее, чем больше скольжение, т. е. чем больше ток главной фазы.

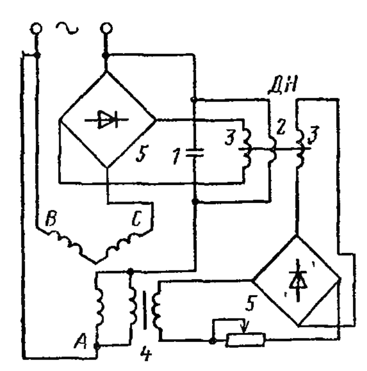


Рис. 30. Схема включення конденсаторного двигателя с регулируемой эквивалентной емкостью:

1 — конденсатор; 2 — обмотка переменного тока дросселя насыщения; 3 — обмотки подмагничивания; 4 — трансформатор напряжения; 5 — выпрямители

Вторая обмотка подмагничивания с большим числом витков является основной. Действие МДС этой обмотки, наоборот, проявляется тем сильнее, чем меньше скольжение, что объясняется характером изменения напряжения на конденсаторной фазе с изменением нагрузки.

В первый момент пуска переменный ток *ДН* должен быть возможно малым. Очевидно, что при равенстве МДС обмоток подмагничивания он будет равен току холостого хода дросселя.

Соблюдение равенства МДС обмоток подмагничивания достигается благодаря тому, что по главной фазе двигателя проходит наибольший (пусковой) ток, а напряжение на конденсаторной фазе в момент пуска приблизительно в 2 раза меньше напряжения по окончании пуска. В результате ток на выходе параллельного участка, образованного конденсатором и обмотками переменного тока *ДН,* т. е. ток конденсаторной фазы, достигает

своего наибольшего значения, определяемого установленной емкостью. Незначительным током первичной обмотки трансформатора напряжения здесь можно пренебречь.

По мере увеличения частоты вращения двигателя возрастает результирующая МДС подмагничивания, вызывая насыщение дросселя. Переменный ток *ДН* при этом увеличивается, а ток конденсаторной фазы уменьшается. При холостом ходе двигателя результирующая МДС подмагничивания *ДН* достигает наибольшего значения, вследствие этого ток конденсаторной фазы становится наименьшим.

Каким же становится характер изменения тока конденсаторной фазы после пуска двигателя в ход? Ток конденсаторной фазы, как вытекает из изложенного, становится функцией результирующей МДС подмагничивания дросселя. Так, увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение результирующей МДС подмагничивания *ДН*, отчего переменный ток дросселя уменьшается, а ток конденсаторной фазы возрастает. Уменьшение нагрузки приводит к обратному результату, т. е. к уменьшению тока конденсаторной фазы. Заметим, что ток конденсатора и ток обмоток переменного тока *ДН* находятся практически в противофазе, так как активные составляющие этих токов пренебрежимо малы. Поэтому значение тока конденсаторной фазы всегда определяется арифметической разностью токов регулирующего устройства:

$$I_{\text{к,ф}} = I_{\text{к}} - I_{\text{ДН}},$$

где $I_{\text{к}}$ — ток конденсатора; $I_{\text{ДН}}$ — ток обмоток переменного тока *ДН*.

Из последнего выражения следует, что соответствующее изменение тока $I_{\text{ДН}}$ равносильно применению в цепи конденсаторной фазы плавно регулируемой эквивалентной емкости.

Для иллюстрации на рис. 31 представлены механические характеристики двигателя мощностью 1 кВт, полученные опытным путем. Кривая *1* относится к схеме с пусковой и рабочей емкостями (см. рис. 9, *г*). Кривая *2* относится к схеме рис. 30. Как видно, пусковой момент двигателя для данной емкости конденсатора остается практически одним и тем же в обоих случаях. На участке от $n_2=0$ до 1000 об/мин кривая *2* проходит несколько ни-

же *1*, что объясняется уменьшением эквивалентной емкости с возрастанием переменного тока *ДН*.

Отключение пускового конденсатора в случае использования в цепи конденсаторной фазы отключаемой емкости (см. рис. 9, *г*) резко уменьшает вращающий момент (вертикальный участок кривой *1*).

Для двигателя, включенного по схеме, приведенной на рис. 30, наоборот, характерны плавный пуск двигателя, увеличенная перегрузочная способность и работа при данной нагрузке на валу с несколько меньшим скольжением.

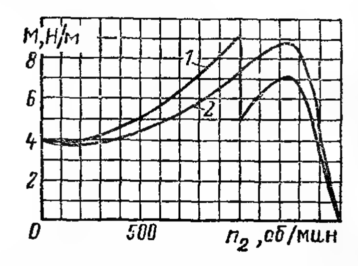


Рис. 31. Механическая характеристика конденсаторного двигателя

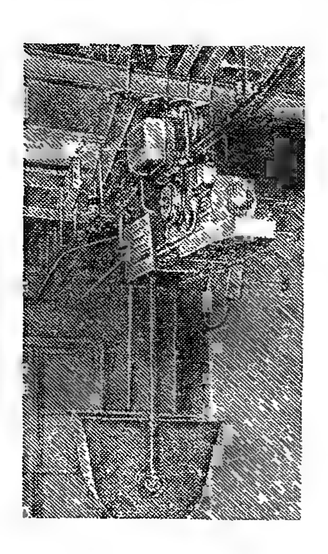


Рис. 32. Электровоз подвесной дороги с конденсаторным двигателем:

1 — двигатель; *2* — реверсивный магнитный пускатель; *3* — коробки с конденсаторами; *4* — кожух дросселя насыщения; *5* — кнопочная станция для ручного управления

Приведем пример применения конденсаторного двигателя, включенного по схеме, показанной на рис. 30, в условиях электрической тяги. Целесообразность использования асинхронного конденсаторного двигателя в электрической тяге подтверждается следующим: двигатель имеет жесткую скоростную характеристику, вследствие которой средняя частота вращения лишь на несколько процентов отличается от синхронной. Таким образом, буксование при движении ограничивается;

при сверхсинхронной частоте вращения (движение под уклон) машина автоматически переходит в генераторный режим, производя тормозное действие; как кон-

денсаторный — двигатель работает с высоким коэффициентом мощности.

Опытный образец электровоза подвесной дороги с конденсаторным двигателем показан на рис. 32. Двигатель электровоза мощностью 1 кВт, 127/220 В включен по схеме, приведенной на рис. 30, на напряжение сети 220 В.

Контактный провод (полосовая сталь 6×30 мм) крепится на изоляторах. Вторым проводом служит заземленный рельс. Управление электровозом возможно как ручное (кнопочная станция реверсионного магнитного пускателя), так и автоматическое с помощью конечных выключателей, установленных в пунктах отправления и выгрузки. Полезная масса состава 0,6 т.

Таким образом, одним из способов улучшения эксплуатационных свойств конденсаторного двигателя является применение регулируемой емкости. Плавное и автоматическое изменение эквивалентной емкости с изменением скольжения проще всего достигается с помощью дросселей насыщения.

Конденсаторный двигатель с плавно регулируемой эквивалентной емкостью имеет следующие достоинства:

пуск происходит без переключений в цепи конденсаторной фазы и динамических толчков, неизбежных при пуске с отключаемой емкостью;

уменьшается ток холостого хода конденсаторной фазы;

улучшается использование мощности вследствие возрастания тока конденсаторной фазы при увеличении нагрузки на валу;

увеличивается перегрузочная способность.

Конденсаторный двигатель, включенный по схеме с автоматически регулируемой эквивалентной емкостью, бесконтактной и искробезопасной, может найти применение в электрической тяге, а также в стационарных установках небольшой мощности.

Пример. *Расчет дросселя насыщения и выбор емкости конденсаторов.*

Исходные данные: напряжение источника питания $U=220$ В; двигатель асинхронный, трехфазный с короткозамкнутым ротором, мощностью 1,1 кВт, 220/127 В, 1420 об/мин; КПД=0,75, $\cos\varphi=0{,}81$, кратность пускового тока $k=5$; сталь сердечника ДН электротехническая марка Э411, штамп имеет размеры, показанные на рис. 33;

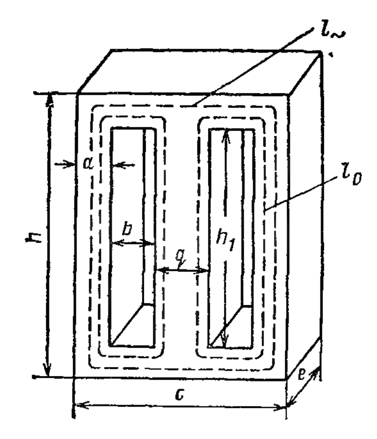


Рис. 33. Сердечник дросселя насыщения:

$a=25$ мм; $b=32$ мм; $c=154$ мм; $h=210$ мм; $h_1=160$ мм; $q=40$ мм

схема включения двигателя по рис. 30; соединение обмоток переменного тока ДН — параллельное.

Обмотки переменного тока ДН располагаются на крайних стержнях Ш-образного сердечника, обмотки подмагничивания — на среднем стержне. Сердечник ДН показан на рис. 33.

1. Номинальный ток двигателя

$$I_{ном} = \frac{P_{ном}}{\sqrt{3}\, U \cos\varphi_{ном}\, \eta_{ном}} = \frac{1{,}1\cdot 10^3}{\sqrt{3}\cdot 220\cdot 0{,}81\cdot 0{,}75} = 4{,}75 \text{ А}.$$

2. Емкость батареи конденсаторов принимаем предварительно равной

$$C = 2{,}55 C_{р.ном} = 2{,}55\cdot 2740 \frac{4{,}75}{220} = 152 \text{ мкФ},$$

где рабочая емкость определяется по (15)

3. Напряжение на параллельном участке, образованном обмотками переменного тока ДН и батареей конденсаторов при номинальном режиме работы,

$$U_к = k_u U = 1{,}1\cdot 220 = 240 \text{ В},$$

где k_u — коэффициент, значение которого для данной схемы включения двигателя принимается равным 1,1.

Заметим, что это напряжение на всем диапазоне изменения скольжения двигателя изменяется настолько незначительно, что с достаточной для практики точностью может быть принято постоянным.

4. Ток батареи конденсаторов

$$I_к = k_с k_u U\omega C\cdot 10^{-6} = 1{,}15\cdot 1{,}1\cdot 220\cdot 314\cdot 152\cdot 10^{-6} = 13{,}2 \text{ А},$$

где $k_с$ — опытный коэффициент, учитывающий отклонение действительной емкости от обозначенной; ω — угловая частота, равная для частоты 50 Гц 314 1/с; C — емкость конденсаторов, мкФ.

5. Пренебрегая потерями в ДН и конденсаторах, а также сдвигом фаз между токами конденсаторной фазы и первичной обмотки трансформатора напряжения, находим значение переменного тока ДН в номинальном режиме работы двигателя:

$$I_{ДНном} = I_к - (I_{к,ф,ном} + I_{1\,ТНном}),$$

где $I_{к,ф,ном} = I_{ном}$ — номинальный ток конденсаторной фазы; $I_{1ТНном}$ — ток первичной обмотки трансформатора напряжения при $U_{к,ф} = U_{ном}$.

Принимая $I_{1ТНном} = 0{,}45$ А, получаем:

$$I_{ДНном} = 13{,}2 - (4{,}75 + 0{,}45) = 8 \text{ А},$$

что соответствует току одной обмотки переменного тока ДН

$$I'_{ДНном} = \frac{I_{ДНном}}{2} = \frac{8}{2} = 4 \text{ А}.$$

6. Задавшись плотностью тока $\delta = 2{,}25$ А/мм², находим площадь поперечного сечения провода:

$$q_1 = \frac{I'_{ДНном}}{\delta} = \frac{4}{2{,}25} = 1{,}77 \text{ мм}^2.$$

Для выполнения обмоток переменного тока ДН используем провод ПБД с диаметром $d_1 = 1{,}5$ мм и толщиной изоляции 0,3 мм (на обе стороны).

7. Площадь Q_1, занятую обмоткой переменного тока ДН, принимаем равной 40 % площади окна Q:

$$Q_1 = 0{,}4Q.$$

Исходя из ширины и высоты площади Q_1, находим число витков обмотки переменного тока ДН:

$$w_{\sim} = m_1 n_1,$$

где m_1 — число слоев обмотки переменного тока; n_1 — число витков в слое. В данном случае $m_1 = 7$, $n_1 = 82$, откуда

$$m_{\sim} = m_1 n_1 = 7 \cdot 82 = 574.$$

8. Расстояние b_1, занятое обмоткой переменного тока по ширине окна:

а) обмотка	$1{,}8 \cdot 7 = 12{,}6$ мм;
б) изоляционные гильзы	$0{,}5 \cdot 2 = 1$ мм;
в) междуслойная изоляция	$0{,}1 \cdot 7 = 0{,}7$ мм

Всего $b_1 = 14{,}3$ мм.

9. Площадь поперечного сечения магнитопровода для переменной составляющей магнитного потока, м^2,

$$Q_a = \frac{k_u U}{4{,}44 f w_\sim B_{max}}.$$

Прнннмая $B_{max}=1{,}2$ Тл, получаем:

$$Q_a = \frac{1{,}1 \cdot 220}{4{,}44 \cdot 50 \cdot 574 \cdot 1{,}2} = 0{,}0016 \text{ м}^2 = 16 \text{ см}^2.$$

10. Толщина пакета определяется нз выражения

$$e = \frac{Q_a}{a} = \frac{16}{2{,}5} = 6{,}4 \text{ см}.$$

11. Чнсло внтков основной (большой) обмотки подмагничивания находим, принимая, что площадь Q_2, занятая обмоткой, составляет 40 % площади окна. Для выполнения обмотки используем провод ПБД с днаметром 1 мм и толщнной изоляции 0,3 мм (на обе стороны).

С учетом размеров площади Q_2 находим:

$$m_2 = 9, \quad n_2 = 108,$$

что соответствует чнслу витков:

$$w_{у2} = m_2 n_2 = 9 \cdot 108 = 972.$$

12 Расстояние, занятое обмоткой по шнрине окна:

а) обмотка	1,3·9=1,7 мм;
б) изоляционые гнльзы	0,5·2=1 мм
	Всего b_2=12,7 мм.

13. Сопротивленне основной обмотки управлення при температуре нагрева t_2

$$R_{у2} = R'_{у2}\left[1 + \alpha\,(t_2 - t_1)\right],$$

здесь α — температурный коэффициент (для меди $\alpha=0{,}004$); $R'_{у2}$ — сопротивление обмоткн при $t_1=20$ °С:

$$R'_{у2} = \frac{l_{2ср}\, w_{у2}}{\gamma q_{у2}},$$

где $l_{2ср}$ — средняя длина внтка; γ — удельная электрическая проводимость меди; $q_{у2}$ — площадь поперечного сечения провода обмоткн.

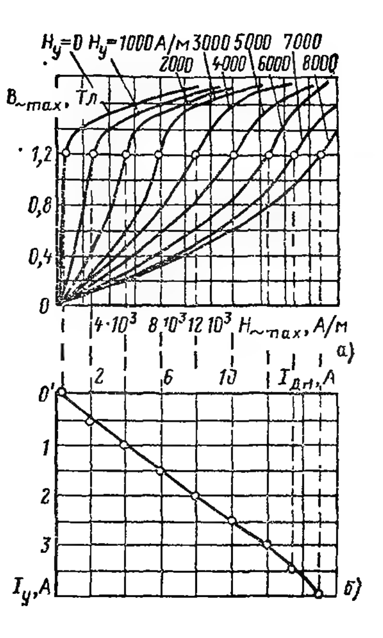


Рис. 34. Совместное графическое решение уравнения схемы $B_{max}=\text{const}$ и характеристик намагничивания $B_{\sim max}=f(H_{\sim max}, H_у)$ дросселя насыщения

Подставив значения $l_{2ср}=0{,}28$ м, $w_{у2}=972$, $\gamma=58$ м/(Ом$\times$мм^2), $q_{у2}=0{,}785$ мм^2, получим:

$$R'_{у2}=6{,}2\ \text{Ом}.$$

Сопротивление обмотки с увеличением температуры возрастает. Так, например, при $t_2=100$ °С

$$R_{у2}=6{,}2\,[1+0{,}004\,(100-20)]=8{,}16\ \text{Ом}.$$

14. Для принятой схемы включения двигателя выполняется условие $U_к=U_{ДН}=\text{const}$ или соответственно

$$B_{max}=\text{const}.$$

Совместное графическое решение уравнения схемы ($B_{max}=\text{const}$) и характеристик намагничивания ДН (рис. 34) позволяет найти зависимости переменной составляющей напряженности магнитного поля от постоянной составляющей

$$H_{\sim max}=f(H_у)$$

и переменного тока ДН от тока управления

$$I_{ДН}=\varphi(I_у).$$

Токи и соответствующие им напряженности пропорциональны, А/м,

$$H_у=\frac{I_у\,w_у}{l_0};$$

$$H_{\sim max}=\frac{\sqrt{2}\,I_{ДН}\,w_{\sim}}{l_{\sim}}.$$

где l_0, $l_\sim$ — средняя длина силовой линии для постоянной и переменной составляющих магнитного потока, м (рис. 33); $w_у$, $w_\sim$ — числа витков обмотки управления и обмотки переменного тока ДН соответственно.

Характеристики намагничивания получают экспериментально для данного образца ДН при одновременном намагничивании сердечника постоянным и переменным током. Каждая кривая (рис. 34, *а*) соответствует определенному значению постоянной составляющей напряженности магнитного поля, например, для первой из них $H_у=0$ (ток $I_у=0$), для второй $H_у=1000$ А/м ($I_у=0{,}5$ А) и т. д. Переменное напряжение при снятии характеристик увеличивают, начиная с нуля, а ток $I_у$ поддерживают постоянным, давая ему определенные значения, например 0, 0,5, 1, 1,5 А и т. д

По точкам пересечения кривых намагничивания с прямой $B_{max}=$ $=\text{const}$ получают зависимость $H_{\sim max}=f(H_у)$ или, в других масштабах, $I_{ДН}=f(I_у)$ Построение последней показано на рис. 34, *б*.

15. Число витков малой обмотки управления $w_{у1}$ находят из условия равенства МДС при пуске двигателя:

$$I_{у1п}\, w_{у1} = I_{у2п}\, w_{у2},$$

где $I_{у1п}$, $I_{у2п}$ — токи малой и основной обмоток подмагничивания при пуске.

Пусковой ток основной обмотки управления пропорционален напряжению на конденсаторной фазе при пуске — $U_{к,ф,п}$. Для данной схемы включения двигателя $U_{к,ф,п}\approx 0{,}5\, U_{к,ф,ном}$ Тогда

$$I_{у2п} = \frac{U_{к,ф,п}}{U_{к,ф,ном}}\, bI_{у,ном} = 0{,}5bI_{у,ном},$$

где $I_{у,ном}$ — ток управления, найденный из графика $I_{ДН}=f(I_у)$ (рис. 34, *б*) для номинального тока ДН; b — коэффициент, учитывающий увеличение тока основной обмотки управления по сравнению с током $I_{у,ном}$ при номинальном режиме, обусловленное размагничивающим действием малой обмотки подмагничивания; его значение может быть принято равным $b=1{,}05$.

Из рис. 34, *б* для номинального тока ДН $I_{ДНном}=$ 8 А находим $I_{у,ном}=2$ А. Тогда

$$I_{у2п} = 0{,}5\cdot 1{,}05\cdot 2 = 1{,}05 \text{ А}.$$

Кратность пускового тока k' главной фазы двигателя меньше кратности k при трехфазном включении, что объясняется наличием в цепи фазы малой обмотки управления и выпрямительных элементов. Принимаем $k'=0{,}75\, k$.

Пусковой ток малой обмотки управления

$$I_{у1п} = k'\, I_{ном,ср},$$

где $I_{ном,ср}$ — среднее значение тока обмотки при номинальной нагрузке;

$$I_{у1п} = 0{,}75k\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\,I_{ном} = 0{,}75\cdot 5\cdot 0{,}9\cdot 4{,}75 = 16\ \text{А}.$$

Число витков малой обмотки управления составит:

$$w_{у1} = w_{у2}\frac{I_{у2п}}{I_{у1п}} = 972\frac{1{,}05}{16} = 64.$$

16. Площадь поперечного сечения провода малой обмотки управления

$$q_{у1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\,\frac{I_{ном}}{\delta} = 0{,}9\frac{4{,}75}{2{,}25} = 1{,}9\ \text{мм}^2.$$

Для выполнения обмотки выбираем провод ПБД с диаметром 1,5 мм и площадью поперечного сечения 1,77 мм². При этом плотность тока в обмотке составит:

$$\delta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\,\frac{I_{ном}}{q_{у1}} = 0{,}9\frac{4{,}75}{1{,}77} = 2{,}43\ \text{А/мм}^2.$$

Толщина изоляции (на обе стороны) составляет 0,3 мм. Обмотка размещается в одном слое.

17 Расстояние b_3, занятое малой обмоткой управления по ширине окна:

а) провод с изоляцией	1,8·1=1,8 мм;
б) кембрик	0,1·1=0,1 мм;
в) изоляционная гильза	0,5·1=0,5 мм
	Всего b_3=2,4 мм

18. Расстояние, занятое обмотками по ширине окна:

$$b_0 = b_1 + b_2 + b_3 = 14{,}3 + 12{,}7 + 2{,}4 = 29{,}4\ \text{мм}$$

при ширине окна b=32 мм.

19. Расчетное значение воздушного зазора между обмотками постоянного и переменного тока

$$b_\delta = b - b_0 = 32 - 29{,}4 = 2{,}6\ \text{мм}.$$

Сопротивление малой обмотки подмагничивания при 20 °С

$$R'_{у1} = \frac{l_{1ср}\,w_{у1}}{\gamma q_{у1}} = \frac{0{,}36\cdot 64}{57\cdot 1{,}77} = 0{,}23\ \text{См}.$$

Для рабочей температуры нагрева 100 °С

$$R_{у1} = R'_{у1}\,[1 + \alpha\,(100 - 20)] = 0{,}23\,(1 + 0{,}004\cdot 80) = 0{,}304\ \text{Ом}.$$

21. Расчет МДС подмагничивания ДН при различных режимах работы двигателя.

Результирующая МДС подмагничивания определяется разностью МДС обмоток управления:

$$F = F_2 - F_1$$

или

$$F = I_{у2} w_{у2} - I_{у1} w_{у1}.$$

Это выражение справедливо для любого режима работы машины.

При пуске двигателя в ход МДС обмоток управления равны:

$$F_1 = I_{у1п} w_{у1} = 0,75 \cdot 5 \cdot 0,9 \cdot 4,75 \cdot 64 = 1022 \text{ А};$$

$$F_2 = I_{у2п} w_{у2} = 0,5 \cdot 1,05 \cdot 972 = 1020 \text{ А}$$

и, следовательно, результирующая МДС $F \approx 0$.

Номинальный режим:

$$F_1 = I_{у1} w_{у1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_{ном} w_{у1} = 0,9 \cdot 4,75 \cdot 64 = 272 \text{ А};$$

$$F_2 = I_{у2} w_{у2} = b I_{у,ном} w_{у2} = 1,05 \cdot 2 \cdot 972 = 2040 \text{ А},$$

что соответствует результирующей МДС

$$F = 2040 - 272 = 1768 \text{ А}.$$

Режим холостого хода:

$$F_1 = I_{у1} w_{у1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_0 w_{у1} = 0,9 \cdot 2,8 \cdot 64 = 161 \text{ А}.$$

В этом выражении I_0 — ток холостого хода двигателя.

Напряжение конденсаторной фазы в режиме холостого хода принимаем равным

$$U_{к\,ф} \approx 1,18\, U_{к,ф,ном},$$

поэтому

$$F_2 = I_{у2} w_{у2} = 1,18 b I_{у,ном} w_{у2} = 1,18 \cdot 1,05 \cdot 2 \cdot 972 = 2410 \text{ А}.$$

Результирующая МДС $F = 2410 - 161 = 2249$ А.

Таким образом, результирующая МДС подмагничивания ДН *возрастает от нуля при пуске до наибольшего значения* в режиме холостого хода, что соответствует описанному выше характеру изменения тока конденсаторной фазы с изменением скольжения.

22. Выбор диодов для выпрямителей.

Диоды для выпрямительных мостиков схемы выбирают по значению допустимого обратного напряжения и допустимому среднему току.

Расчет обратного напряжения производят по формуле

$$U_{обр} = I_у R_у + \Delta U,$$

где $I_у$ — прямой ток цепи управления (среднее значение); $R_у$ — сопротивление цепи управления при расчетной температуре; ΔU — прямое падение напряжения на диоде (среднее значение).

а) Малая обмотка управления.

Расчетными величинами являются пусковой ток главной фазы и сопротивление обмотки при 100 °С:

$$U_{обр} = I_{у1п} \times R_{у1} + \Delta U = (16 \cdot 0,304 + 1,5) = 6,35 \text{ В}.$$

Выбираем диоды кремниевые типа Д242 на ток 10 А с обратным напряжением $U_{обр max}$=100 В. Диоды допускают тройную перегрузку по току в течение 0,5 с.

б) Основная обмотка управления.

Сопротивление обмотки при 100 °С $R_{у2}$=8,16 Ом.

Сопротивление $R_р$ регулировочного реостата в цепи обмотки управления принимаем равным 4 Ом.

Расчетным током является ток обмотки (среднее значение) в режиме холостого хода двигателя:

$$I_{у2_х} = 2 \cdot 1,05 \cdot 1,18 = 2,48 \text{ А}.$$

Обратное напряжение

$$U_{обр} = I_{у2_х} (R_{у2} + R_р) + \Delta U = 2,48 \cdot 12,16 + 1,5 = 31,9 \text{ В}.$$

Выбираем диоды типа Д242Б с допустимым током 5 А (среднее значение) и обратным напряжением $U_{обр max}$=100 В.

23. Выбор емкости конденсаторов.

Емкость батареи конденсаторов при включении двигателя по схеме рис. 30 остается постоянной. Поэтому выбор ее производят по (16), исходя из изложенных выше соображений получения необходимого пускового момента.

16. ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ В УСТРОЙСТВАХ УПРАВЛЕНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

Полупроводниковые приборы получили большое распространение в радиосвязи, автоматизированном электроприводе, в телевизионных устройствах и телемеханике, электронных устройствах атомной и ракетной техники, в медицине, физике, металлургии и т. д.

По сравнению с электронными лампами они обладают рядом существенных преимуществ, основными из которых являются: 1) отсутствие цепей накала, что дает весьма значительную экономию электроэнергии источников питания; 2) малая масса и малые габариты; 3) вы-

сокая эксплуатационная надежность; 4) большой срок службы (до десятков тысяч часов); 5) механическая прочность, нечувствительность к сотрясениям и ударам.

Отмеченные достоинства полупроводников и обусловили широкое их применение в различных областях науки и техники.

Схема конденсаторного двигателя, основанная на использовании полупроводниковых приборов, показана на рис. 35.

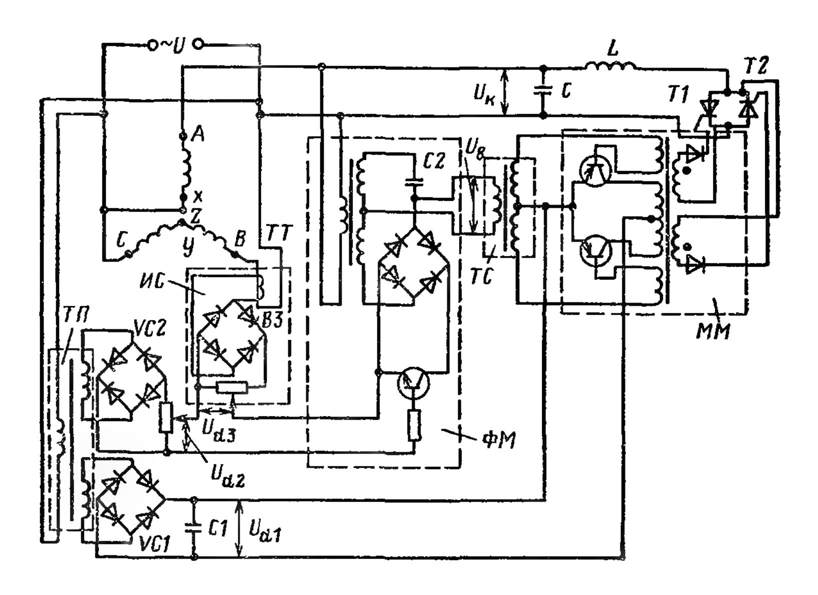


Рис 35. Схема включения конденсаторного двигателя с регулятором эквивалентной емкости на полупроводниковых приборах:

ТТ — трансформатор тока; *ИС* — источник сигнала; *ФМ* — фазовращательный мост; *ТС* — трансформатор согласования; *ММ* — магнитный мультивибратор; *Т1, Т2,* — тиристоры, *С* — емкость конденсаторной фазы; *L* — индуктивность линейного дросселя, *ТП* — трансформатор питания (через выпрямители) мультивибратора и системы регулирования эквивалентной емкости конденсаторной фазы

В силовую часть схемы входят статорные обмотки двигателя, конденсатор, линейный дроссель и тиристоры. Последние соединены между собой встречно-параллельно, а последовательная цепь, образованная обмоткой дросселя и тиристорами, включена параллельно конденсатору.

Емкость конденсатора не изменяется, т. е. выполняется условие

$$C = \text{const}.$$

Фаза $A—x$ является конденсаторной. Две другие статорные обмотки (фазы $B—y$ и $C—z$), соединенные последовательно, образуют главную фазу, включаемую на напряжение U сети.

Баланс напряжений, действующих в цепи конденсаторной фазы, описывается уравнением (28а).

Ток конденсаторной фазы равен геометрической сумме токов конденсатора и дросселя:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{к.ф} = \underline{I}_к + \underline{I}_L,$$

где $I_к$ — ток конденсатора; I_L — ток дросселя.

Если пренебречь потерями в конденсаторе и дросселе как несущественными, то он будет определяться арифметической разностью этих токов:

$$I_A = I_к - I_L,$$

причем по условию сдвига фаз между токами главной и конденсаторной фаз на угол, равный или близкий к 90° (см. векторную диаграмму рис. 22), должно быть выполнено неравенство

$$I_к > I_L.$$

Ток конденсатора постоянной емкости остается практически постоянным:

$$I_к \approx \text{const}.$$

Следовательно, необходимого изменения тока конденсаторной фазы с изменением нагрузки двигателя можно достигнуть путем соответствующего регулирования тока дросселя. Возникающее при этом изменение разности токов ($I_к—I_L$) аналогично регулированию эквивалентной емкости конденсаторной фазы.

Очевидно, что с возрастанием нагрузки ток дросселя должен уменьшаться и, наоборот, увеличиваться, когда нагрузка уменьшается. Тогда по характеру изменения тока конденсаторная фаза не будет отличаться от главной фазы.

Оптимальному режиму регулирования соответствует равенство токов

$$I_A = I_{к.ф} = I_{г.ф}$$

при любой произвольно взятой нагрузке.

Из изложенного вытекает, что по идее регулирования эквивалентной емкости конденсаторной фазы схемы, приведенные на рис. 30 и 35, аналогичны. Однако они принципиально отличаются друг от друга по способу воздействия на ток дросселя. Если в схеме рис. 30 переменный ток дросселя насыщения зависит от режима подмагничивания сердечников, то в рассматриваемой схеме действующее значение тока дросселя является функцией угла сдвига фаз управляющих прямоугольных сигналов, подводимых к тиристорам, относительно напряжения $U_к$ на конденсаторе.

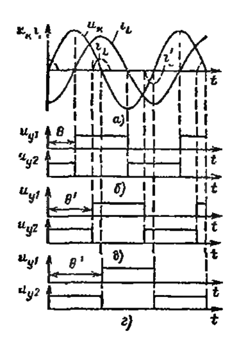


Рис 36. Графики, поясняющие процесс регулирования тока дросселя с помощью тиристоров:

а — синусоидальные кривые изменения напряжения конденсатора и тока дросселя; *б* — зависимости прямоугольных управляющих импульсов напряжения, подаваемых на вход тиристоров при фазовом угле сдвига $\theta = [\widehat{\underline{U}_к; \underline{U}_у}] = 90°$; *в* — то же при $90° < \theta < 180°$; *г* — то же при $\theta = \theta'' = 180°$

Будем по-прежнему полагать, что потери в конденсаторе и дросселе отсутствуют. При этом допущении ток дросселя будет отставать от приложенного к нему напряжения по фазе на 90°. Синусоидальные кривые напряжения на конденсаторе и тока дросселя показаны на рис. 36. По этим кривым, построенным в определенном масштабе, нетрудно определить значение напряжения $U_к$ на конденсаторе или тока i_L дросселя для любого момента времени.

Обозначим угол сдвига фаз управляющих прямоугольных импульсов относительно напряжения на конденсаторе через θ и рассмотрим зависимость тока дросселя от этого угла применительно к следующим случаям: а) $\theta = 90°$; б) $90° < \theta < 180°$; в) $\theta = 180° = \theta''$.

На вход тиристоров *Т1* и *Т2* поочередно подаются управляющие импульсы напряжения $u_{у1}$ и соответственно $u_{у2}$.

Ток дросселя. управляемый с помощью тиристоров, будет несинусоидальным. Но периодически изменяю-

щуюся функцию времени с несинусоидальной формой кривой, как известно из электротехники, можно представить в виде суммы составляющих синусоид, из которых определяющее значение имеет первая (основная) гармоника. Ее мы и будем иметь в виду при дальнейшем изложении.

Случай а). Управляющие импульсы напряжения должны быть сдвинуты по фазе относительно напряжения $u_к$ в сторону отставания на 90°, что иллюстрируется кривыми, приведенными на рис. 36, *а, б*.

Как видно, в момент прохождения напряжения $u_к$ через положительный максимум на вход тиристора *Т1* подается управляющий импульс напряжения $u_{у1}$ и этот тиристор открывается. По обмотке дросселя проходит ток i_L в течение всего положительного полупериода.

Когда напряжение $u_к$, изменяясь, достигнет наибольшего отрицательного значения, на вход тиристора *Т2* подается управляющий импульс напряжения $u_{у2}$ и этот тиристор открывается. В тот же момент времени прекращается подача импульса напряжения $u_{у1}$. Тиристор *Т1*, оказавшись под воздействием обратного напряжения, закрывается. По обмотке дросселя в течение всего отрицательного полупериода проходит ток i_L.

Затем, как только напряжение $u_к$ вновь достигнет положительной амплитуды, откроется тиристор *Т1*, тиристор *Т2* закроется и т. д.

Таким образом, при сдвиге управляющих прямоугольных сигналов относительно напряжения $u_к$ в сторону отставания на 90° по обмотке дросселя проходит ток в течение всего периода, а амплитуда тока дросселя достигает наибольшего значения.

Индуктивное сопротивление дросселя (по первой гармонике) имеет минимальное значение:

$$x_{L(1)} = \frac{U_к}{I_{L(1)}},$$

где $I_{L(1)}$ — действующее значение основной гармоники тока дросселя. Из сказанного следует, что углу сдвига фаз $\theta = 90°$ соответствует наименьшее значение тока конденсаторной фазы.

Случай б). Угол θ может, например, принять значение, приведенное на рис. 36, *в*.

В момент подачи управляющего импульса напряжения $u_{у1}$ на вход тиристора *Т1* (см. рис. 35) этот тирис-

тор открывается и по обмотке дросселя начинает проходить ток i'_L в положительном направлении.

При прохождении напряжения $u_к$ через нулевое значение ток i'_L достигает наибольшего значения и далее начинает уменьшаться.

Вследствие того, что управляющие сигналы, подаваемые на вход тиристоров, сдвинуты по фазе на 180°, через полпериода напряжения $u_к$ включится тиристор *T2* и по обмотке дросселя пойдет ток i'_L в обратном (отрицательном) направлении. Затем еще через полпериода напряжения $u_к$ включится тиристор *T1* и направление тока i'_L изменится на обратное и т. д.

Очевидно, что по мере увеличения угла θ от 90 до 180° амплитуда первой гармоники тока дросселя будет все более уменьшаться, а ток конденсаторной фазы возрастать. Следовательно, с увеличением нагрузки на валу машины необходимо осуществлять увеличение угла θ в пределах от 90 до 180°.

Предельному случаю, при котором угол θ принимает значение $\theta''=180°$, соответствуют кривые рис. 36, *г*. Управляющий импульс напряжения $u_{у1}$ подается на вход тиристора *T1*, когда напряжение $u_к$, изменив свой знак, начинает увеличиваться в отрицательном направлении. Тиристор оказывается под воздействием обратного напряжения и не открывается.

Через полпериода будет подан управляющий импульс напряжения $u_{у2}$ на вход тиристора *T2*. Этот тиристор также окажется под воздействием обратного напряжения и не откроется.

Условию $\theta=\theta''=180°$ соответствует равенство

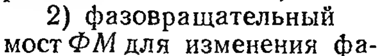
$$I_A = I_{к.ф} = I_к,$$

так как цепь дросселя остается разомкнутой.

Итак, для ограничения тока дросселя с увеличением нагрузки двигателя необходимо увеличивать угол θ от 90° до значения, соответствующего приложенной нагрузке.

Схема регулирования, обеспечивающая указанный характер изменения угла θ, обычно включает в себя следующие элементы (см. рис. 35):

Рис. 37. Схема магнитиого мультивибратора



1) магнитный мультивибратор *ММ*, преобразующий синусоидальное напряжение в прямоугольное (для управления тиристорами) и усиливающий мощность управляющих сигналов;

2) фазовращательный мост *ФМ* для изменения фазы выходного синусоидального напряжения относительно напряжения $U_к$;

3) трансформатор согласования *ТС* параметров выходной цепи фазовращательного моста с параметрами входа мультивибратора;

4) измерительный элемент *ИЭ*, измеряющий ток главной фазы двигателя и осуществляющий воздействие на систему в нужном направлении для изменения тока дросселя в соответствии с изменением тока главной фазы;

5) устройство для обеспечения начального значения угла θ (при минимальном значении тока главной фазы).

Мультивибратор *ММ* (рис. 37) состоит из двух транзисторов *Т1*, *Т2*, включенных по схеме с общим эмиттером, и трансформатора *Т*, имеющего четыре первичные и две вторичные обмотки.

Рассмотрим принцип действия мультивибратора. Пусть ЭДС источников сигналов $e'_{2с}$ и $e''_{2с}$ направлены, как показано на рис. 37, сверху вниз, причем потенциал базы транзистора *Т1* по отношению к потенциалу эмиттера становится отрицательным. Транзистор *Т1* открывается. В то же время транзистор *Т2* закрыт, так как на его базу подается положительный по отношению к эмиттеру потенциал.

В контуре плюс источника питания — эмиттер транзистора *Т1* — коллектор — первичная обмотка трансформатора *Т* — минус источника питания возникает ток,

создающий в сердечнике магнитный поток. С изменением магнитного потока в обмотках трансформатора *Т* наводятся ЭДС, обозначенные на рис. 37 пунктирными стрелками.

Под влиянием ЭДС e_2 вторичной обмотки мультивибратора по сопротивлению нагрузки, не показанному на рис. 37, потечет ток i_2.

Как видно, ЭДС первичных обмоток мультивибратора, включенных в цепи баз $e'_{ос}$ и $e''_{ос}$, имеют направление, при котором на базе транзистора *Т1* поддерживается отрицательный потенциал, а на базе транзистора *Т2* — положительный. Таким образом, эти обмотки выполняют функцию положительной обратной связи.

С изменением знака ЭДС источников сигналов, а именно, когда потенциал базы транзистора *Т2* по отношению к потенциалу эмиттера станет отрицательным, а потенциал базы транзистора *Т1* по отношению к потенциалу эмиттера — положительным, произойдет переключение транзисторов. Во втором полупериоде входного напряжения мультивибратора открывается транзистор *Т2*, а транзистор *Т1* закрывается. В следующем полупериоде транзисторы поменяются выполняемыми функциями и т. д. Таким образом, транзисторы мультивибратора и обмотки, включенные в коллекторные цепи транзисторов, работают по полупериодам. Частота переключения транзисторов определяется частотой входного напряжения.

На выходе мультивибратора формируется переменное напряжение прямоугольной формы, т. е. мультивибратор преобразует синусоидальное напряжение в прямоугольное и, кроме того, усиливает мощность управляющих сигналов. Возможность получения кривой выходного напряжения с достаточно крутым фронтом обеспечивается применением ферритового сердечника с прямоугольной формой петли гистерезиса.

Магнитный поток сердечника при переключении транзисторов изменяется от одного предельного значения до другого за время от 0,3 до 12 мкс, т. е. почти мгновенно.

Питание магнитного мультивибратора осуществляется от выпрямителя *В1*, включенного в цепь одной из вторичных обмоток трансформатора *ТП* (см. рис. 35). Конденсатор с емкостью *С1*, находящийся под напряжением U_{d1}, служит фильтром высших гармоник.

Фазовращательный мост (рис. 35 и 38) состоит из трансформатора, конденсатора с емкостью $C_2=\mathrm{const}$, выпрямителя и регулируемого активного сопротивления $r_2=\mathrm{var}$.

Две выходные обмотки трансформатора выполняют роль двух плеч моста. Два других плеча образуют конденсатор и активное сопротивление. Последнее реализуется в виде транзистора, включенного в диагональ выпрямительного моста.

Напряжение $U_в$, возникающее на выходных зажимах фазовращательного моста *ФМ*, подается на вход трансформатора согласования *ТС* (см. рис. 35).

Рассмотрим принцип действия фазовращательного моста, полагая для упрощения, что нагрузка отсутствует, т. е. мост работает в режиме холостого хода (рис. 38).

Напряжения вторичных обмоток фазовращательного моста равны и совпадают по фазе:

$$\underline{U}'_2 = \underline{U}''_2.$$

Ток I_2, проходя по замкнутому контуру, образованному плечами моста, вызывает падения напряжения:

на активном сопротивлении

$$\underline{U}_{a2} = \underline{I}_2 r_2$$

и на сопротивлении конденсатора фазовращательного моста

$$\underline{U}_{C2} = \underline{I}_2 \underline{x}_{C2},$$

причем первое совпадает по фазе с током, а второе отстает от него на 90°.

Баланс напряжений вторичной цепи трансформатора описывается уравнением

$$\underline{U}_2 = \underline{U}'_2 + \underline{U}''_2 = \underline{U}_{a2} + \underline{U}_{C2},$$

т. е. напряжение $\underline{U}_2$ на выходе трансформатора всегда равно геометрической сумме падений напряжений на активном сопротивлении r_2 фазовращательного моста и на реактивном сопротивлении конденсатора x_{C2}. Эти падения напряжений связаны с напряжением $\underline{U}_в$ на выходе

фазовращательного моста *ФМ*, т. е. на входе трансформатора согласования *ТС* (см. рис. 35), соотношениями

$$\underline{U}_{a2} = \underline{U}'_2 + \underline{U}_в;$$

$$\underline{U}_{C2} = \underline{U}''_2 - \underline{U}_в,$$

из которых нетрудно определить напряжение на выходе моста по величине и фазе.

Если соблюдается равенство сопротивлений

$$r_2 = x_{C2},$$

то

$$U_{a2} = U_{C2}$$

и векторная диаграмма фазовращательного моста принимает вид, показанный на рис. 39, *а*. При этом условии напряжение $\underline{U}_в$ на выходе фазовращательного моста сдвинуто относительно напряжения $U_к$ по фазе на 90° в сторону отставания.

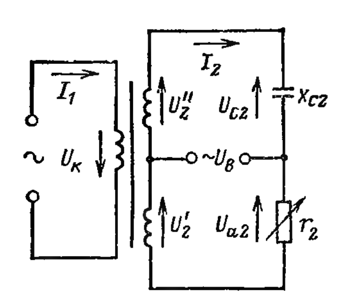


Рис 38. Принципиальная схема фазовращательного моста

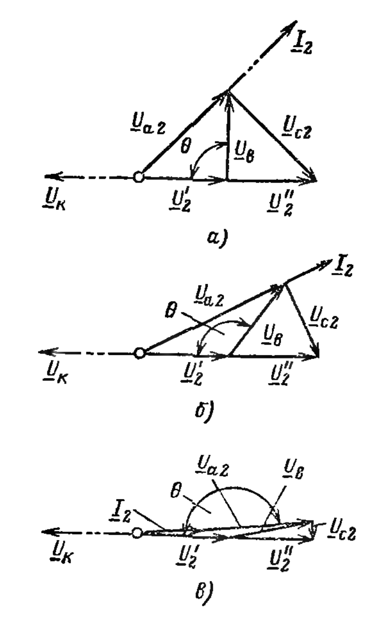


Рис. 39. Векторные диаграммы фазовращательного моста:

а — при $r_2 = x_{C2}$ ($\theta = 90°$); *б* — при $r_2 = 2x_{C2}$ ($90 < \theta < 180°$); *в* — при $r_2 = 10x_{C2}$ ($\theta \approx 180°$)

С увеличением активного сопротивления падения напряжений на сопротивлениях фазовращательного моста перераспределяются и вектор напряжения $U_в$ на выходе моста поворачивается в направлении часовой стрелки. Так, соотношению сопротивлений

$$r_2 = 2x_{C2}$$

соответствует векторная диаграмма рис. 39, *б*.

Угол, образованный векторами $\underline{U}_к$ и $\underline{U}_в$, превышает 90°, а при соотношении

$$r_2 = 10x_{C2}$$

он приближается к 180° (рис. 39, *в*).

Из изложенного следует, что увеличение активного сопротивления фазовращательного моста от $r_2 = x_{C2}$ до некоторого значения $r_2 \gg x_{C2}$ вызывает увеличение угла сдвига фаз от $(\widehat{\underline{U}_к; \underline{U}_в}) = 90°$ до $(\widehat{\underline{U}_к; \underline{U}_в}) \approx 180°$. Приближенно можно считать (пренебрегая сдвигом фаз в согласующем трансформаторе и магнитном мультивибраторе), что и прямоугольное напряжение на выходе мультивибратора будет таким же образом изменяться по фазе относительно напряжения $\underline{U}_к$ с изменением активного сопротивления r_2, т. е. от $\theta = 90°$ до $90° < \theta \leqslant 180°$.

Итак, уменьшение тока дросселя, включенного в цепь конденсаторной фазы параллельно конденсатору (рис. 35), с ростом тока главной фазы достигается увеличением фазового угла сдвига θ путем увеличения активного сопротивления r_2 фазовращательного моста в пределах от $r_2 = x_{C2}$ до $r_2 \approx (20 \div 30)\ x_{C2}$.

Сопротивление r_2 — это сопротивление коллекторной цепи транзистора, являющееся функцией тока базы. Оно увеличивается с уменьшением тока базы.

Следовательно, при минимальной нагрузке (режим холостого хода двигателя) необходимо создать начальный ток базы, удовлетворяющий равенству сопротивлений $r_2 = x_{C2}$. С появлением нагрузки ток базы транзистора должен уменьшаться тем сильнее, чем больше нагрузка.

Для создания начального тока базы транзистора служит трансформатор *ТП* (см. рис. 35), одна из вторичных обмоток которого через выпрямитель *В2* присоединена к потенциометру. Напряжение на выходе потенциометра не зависит от режима работы двигателя и при данном фиксированном положении подвижного контакта остается постоянным:

$$U_{d2} = \text{const}.$$

Напряжение на выходе другого потенциометра, включенного через выпрямитель *В3* во вторичную цепь трансформатора тока, являющееся напряжением обратной связи, пропорционально току главной фазы:

$$U_{d3} = kI_{\text{г.ф}},$$

где k — коэффициент пропорциональности.

Напряжения U_{d2} и U_{d3} действуют в цепи база — эмиттер транзистора, причем относительно друг друга они направлены встречно. Их алгебраическая сумма определяет напряжение, подведенное к этой цепи:

$$U_{\text{б.э}} = U_{d2} - kI_{\text{г.ф}}.$$

При минимальном токе главной фазы ток базы транзистора становится наибольшим, что видно из соотношения

$$U_{\text{б.э}\,max} = U_{d2} - kI_{\text{г.ф}\,min}.$$

При этом в цепи эмиттер — коллектор транзистора проходит увеличенный ток, при котором обеспечивается равенство сопротивлений фазовращательного моста ($r_2 = x_{C2}$), соответствующее фазовому углу сдвига $\theta = 90°$.

Увеличение нагрузки (тока главной фазы) приводит к уменьшению напряжения $U_{\text{б.э}}$ и соответственно тока базы транзистора. Сопротивление цепи коллектор — эмиттер увеличивается, вызывая увеличение фазового угла сдвига θ. Максимумы импульсов тока дросселя и амплитуды первой гармоники тока дросселя ограничиваются. В результате происходит возрастание тока конденсаторной фазы.

Максимальному току главной фазы удовлетворяют соотношения

$$U_{б,э\,min} = U_{d2} - kI_{г,ф\,max};$$

$$r_2 \gg x_{C2};$$

$$\theta \approx 180^\circ,$$

соответствующие току конденсаторной фазы:

$$I_A = I_{к,ф} = I_к.$$

17. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОБСЛУЖИВАНИИ КОНДЕНСАТОРОВ

Использование конденсаторов в силовых электрических цепях, в частности в схемах включения конденсаторного двигателя, связано с необходимостью проведения обязательных мер, обеспечивающих безопасность обслуживающего персонала.

Основной мерой обеспечения безопасности обслуживания является устройство ограждений, исключающих возможность случайного прикосновения к открытым токоведущим частям, находящимся под напряжением. Желательно иметь сетчатые ограждения. При отсутствии металлической сетки ограждения могут быть сделаны в виде кожуха из листовой стали (рис. 40).

Батарею конденсаторов необходимо надежно закрепить, чтобы предупредить смещение ее от возможных

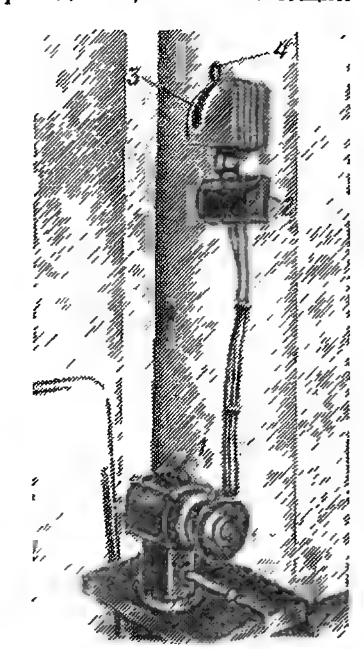


Рис 40. Электроточилка с конденсаторным двигателем:

1 — двигатель; 2 — кожух из листовой стали с конденсаторами; 3 — рукоятка в положении «пуск» (включена пусковая емкость); 4 — рукоятка в положении «работа» (включена только рабочая емкость)

вибраций и сотрясений. Расположение батареи и устройство ограждений должны обеспечить удобный доступ к конденсаторам.

Замена неисправных плавких вставок предохранителей производится только при замкнутом рубильнике в цепи отключаемой емкости. Каждый раз после выключения двигателя следует замыкать цепь с отключаемой (пусковой) емкостью, тем самым подготавливая схему к очередному пуску.

Необходимо иметь в виду, что конденсатор с исправной изоляцией после отключения сохраняет напряжение на выводах в течение длительного времени. В наиболее неблагоприятном случае оно может достигать амплитуды напряжения переменного тока.

Опасность поражения электрическим током при прикосновении к заряженному конденсатору тем больше, чем больше его емкость и выше напряжение.

При производстве ремонтных работ и испытаниях после каждого отключения конденсатора производится его разряд В качестве разрядного сопротивления проще всего использовать несколько электрических ламп накаливания, соединенных последовательно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Адаменко А. И.** Однофазные конденсаторные двигатели Киев: Изд-во АН УССР, 1960

2. **Долин П. А.** Справочник по технике безопасности. — 6-е изд, перераб и доп М · Энергоатомиздат, 1984

3 **Меркин Г. Б.** Конденсаторные электродвигатели для промышленности и транспорта. М — Л · Энергия, 1966

4 Справочник по электрическим конденсаторам/Под общ ред И И Четверткова М Радио и связь, 1983

5 Полупроводниковые приборы Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы Справочник/Под общ ред Н Н Горюиова М: Энергоиздат, 1982

6 **Сырых Н Н.** Эксплуатация сельскнх электроустановок. М.: Агропромиздат, 1986.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
1. Асинхронный двигатель трехфазного тока Основные технические данные 4
2. Работа трехфазного асинхронного двигателя от сети однофазного тока Способы пуска 13
3 Конденсаторный двигатель 18
4 Конденсаторы 21
5 Электрические схемы конденсаторного двигателя . . 24
6 Определение рабочей и пусковой емкости 27
7. Напряжение на конденсаторе 29
8. Выбор схемы включения 31
9 Графическое изображение синусоидальных величин . . 37
10 Графики зависимостей токов и напряжений конденсаторного двигателя от нагрузки 42
11. Векторные диаграммы конденсаторного двигателя . . 46
12 Расчетное определение рабочей емкости 53
13 Конденсаторный двигатель как преобразователь числа фаз 57
14 Работа конденсаторного двигателя при условиях, отличающихся от номинальных 66
15 Улучшение эксплуатационных свойств конденсаторного двигателя 68
16. Применение полупроводниковых приборов в устройствах управления конденсаторным двигателем 81
17. Техника безопасности при обслуживании конденсаторов 93

Список литературы 94

Производственное издание

ТОРОПЦЕВ НИКОЛАЙ ДЕМИДОВИЧ

Трехфазный асинхронный двигатель в схеме однофазного включения с конденсатором

Редактор *В М Киселев*
Редактор издательства *А В Волковицкая*
Художественные редакторы *В А. Гозак-Хозак, Г И Панфилова*
Технический редактор *Т Ю Андреева*
Корректор *М Г Гулина*
ИБ № 2588

Сдано в набор 22 02 88 Подписано в печать 27 06 88 Формат 84×108[1]/32. Бумага типографская № 2 Гарнитура литературная Печать высокая. Усл печ л 5 04 Усл кр отт 5 25 Уч изд л 5,06. Тираж 73 000 экз. Заказ № 69 Цена 25 к

Энергоатомиздат 113114 Москва М 114, Шлюзовая наб, 10

Владимирская типография Союзполиграфпрома при Госкомиздате СССР 600000, г Владимир, Октябрьский проспект, д 7

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ готовит к изданию в 1989 году в серии «Библиотека электромонтера» следующие книги:

Байтер И. И., Богданова Н. А. Релейная защита и автоматика питающих элементов собственных нужд тепловых электростанций. — 3-е изд., перераб. и доп. — 7,5 л: 35 к.

Будаев М. И. Высокочастотные защиты линий 110—220 кВ. — 6,5 л.: 35 к.

Голаицов Е. Б., Молчанов В. В. Дифференциальные защиты трансформаторов с реле типа ДЗТ-21 (ДЗТ-23). — 6,5 л.: 35 к.

Гордон С. В. Моя профессия — электролинейщик. — 7 л.: 35 к.

Кузнецов А. П. Определение мест повреждения на воздушных линиях электропередачи. — 7 л.: 35 к.

Овчинников В. В. Реле РНТ в схемах дифференциальных защит. — 3-е изд., перераб. и доп. — 6 л.: 30 к.

Шабад М. А. Защита трансформаторов 10 кВ. — 7,5 л.: 35 к.

С аннотациями на эти книги Вы можете ознакомиться в тематическом плане выпуска литературы Энергоатомиздата на 1989 год, который имеется во всех книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, а также в технических библиотеках.

Предварительные заказы на эти книги принимают все магазины научно-технической литературы с 15 апреля по 31 октября 1988 года.

25 к.